ÉTUDE FAO: FORÊTS 27

manuel d'inventaire forestier

avec références particulières aux forêts tropicales hétérogènes

ORGANISATION DES NATIONS UNIES POUR L'ALIMENTATION ET L'AGRICULTURE
Rome 1981

Les appellations employées dans cette publication et la présentation des données qui y figurent n'impliquent de la part de l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture aucune prise de position quant au statut juridique des pays, territoires, villes ou zones, ou de leurs autorités, ni quant au tracé de leurs frontières ou limites.

M-35
ISBN 92-5-201132-3

Tous droits réservés. Aucune partie de cette publication ne peut être reproduite, mise en mémoire dans un système de recherche bibliographique ni transmise sous quelque forme ou par quelque procédé que ce soit: électronique, mécanique, par photocopie ou autre, sans autorisation préalable. Adresser une demande motivée au Directeur de la Division des publications, Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, Via delle Terme di Caracalla, 00100 Rome (Italie), en indiquant les passages ou illustrations en cause.

© FAO 1991

PREAMBULE

Le Département des forêts, auparavant Division des forêts et des produits forestiers, de l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, travaille depuis sa création à la conception et à la mise en oeuvre de programmes d'évaluation de ressources forestières à tous les niveaux, depuis les enquêtes à l'échelle mondiale ou régionale jusqu'aux inventaires locaux pour l'aménagement. La FAO a été chargée de la réalisation d'inventaires forestiers dans de nombreux pays du monde, et d'une série d'études au niveau mondial et régional - telles que l'Inventaire forestier mondial et les études régionales sur la consommation, la production et le commerce du bois. Elle a aussi déjà publié quelques documents de caractère méthodologique sur l'inventaire forestier tels que ''Préparation d'un inventaire forestier'' par B. Husch et le ''Manual for Forest Inventory Operations Executed by FAO'' (1967).

Pour tenir compte de l'expérience acquise ces dernières années par la FAO dans ce domaine et dans le cadre de ses activités de formation et de vulgarisation, M. J.P. Lanly, qui s'occupe des questions d'évaluation des ressources forestières au sein de l'Organisation, a été chargé d'écrire un nouveau manuel d'inventaire forestier. Ce manuel est destiné essentiellement aux ingénieurs qui s'occupent d'inventaire et d'aménagement des forêts tropicales hétérogènes car il se limite à la présentation des méthodes et des dispositifs qui se sont avérés praticables dans ces régions.

Au début de 1972 une trentaine de spécialistes du monde entier ont été invités à nous faire part de leurs commentaires sur le plan du manuel et sur son contenu. La plupart de leurs suggestions ont été prises en considération. Nous les remercions tous de leur contribution, nous tenons à mentionner tout particulièrement M. P.G. de Vries, de l'Université néerlandaise de Wageningen, dont les suggestions ont été particulièrement utiles. Les parties du Chapitre V concernant les mesures dendrométriques et les techniques d'estimation des volumes ont servi pour les cours donnés par M. J.P. Lanly dans le cadre du Centre de formation organisé en août et septembre 1973 par le Collège forestier royal de Stockholm en collaboration avec la FAO, et donnent en particulier des indications sur l'estimation des volumes utilisables et l'évaluation de l'accessibilité, deux sujets qui méritent plus d'attention qu'ils n'en ont reçu jusqu'à présent. La partie traitant des problèms d'accessibilité à été revue par M. U. Sundberg, Chef de la Sous-Division de l'exploitation et des transports en forêt de la Division des ressources forestières, et le Chapitre VI sur l'enregistrement et le traitement des données est dû à M. Marsch de la Sous-Division de l'aménagement forestier. Nous remercions également le Centre technique forestier tropical (France) pour la traduction en français de ce document dont l'original a été rédigé en anglais.

R.G. Fontaine
Directeur
Division des ressources forestières

TABLE DES MATIERES

Page

CHAPITRE I – INTRODUCTION 2

1 Historique 2

2 Principales caractéristiques de cette nouvelle édition 2

CHAPITRE II – BUTS ET PLAN D'UN INVENTAIRE FORESTIER 5

1 Buts de l'inventaire 5

11 Introduction 5

12 Définition des objectifs 6

2 Canevas pour l'élaboration des plans d'inventaire 9

CHAPITRE III – TECHNIQUES ELEMENTAIRES DE SONDAGE 13

1 Introduction 13

11 L'échantillonnage (ou sondage) en inventaire forestier 13

12 Plan du chapitre 14

2 Concepts statistiques 14

21 Population 14

22 Distribution 15

221 Différents types de valeurs des paramètres dans une unité d'une population 15

222 Distribution des valeurs d'un paramètre dans l'ensemble d'une population 16

223 Caractéristiques de valeur centrale et de dispersion d'une distribution 17

224 Valeur d'un paramètre par unité de surface dans une unité de population 19

23 Echantillonnage 19

231 Taille de l'échantillon 20

232 Précision et erreur d'échantillonnage 20

233 Autres concepts 21

24 Biais et erreurs de mesure 22

241 Biais 22

242 Erreurs de mesure 24

3 Techniques mathématiques et statistiques de base 24

31 Principes de l'estimation de l'erreur d'échantillonnage 24

311 Introduction 24

312 Estimation de l'erreur d'échantillonnage sur $\hat{\mu}_j$ à partir de sa variance 27

32 Variance de valeurs composées 29

321 Introduction 29

322 Variances de quelques fonctions 30

Page

33 Estimations par le quotient 34

34 Optimisation des plans de sondage 35

341 Optimisation d'un plan de sondage 35

342 Optimisation d'un inventaire 38

4 Plans de sondage classiques 39

41 Classification des plans de sondage 39

411 Caractéristiques des plans de sondage 39

412 Grappes et unités de relevé 41

42 Plans de sondage classiques utilisés en foresterie 41

421 Introduction 41

422 Plans de sondages aléatoires 43

423 Sondages systématiques 55

CHAPITRE IV - UTILISATION DE LA TELEDETECTION ET DES CARTES POUR L'ESTIMATION DES SURFACES EN INVENTAIRE FORESTIER 61

1 Introduction 61

2 Classification des forêts et de l'occupation des sols 62

21 Critères de classification 62

22 Classifications fondées sur les relations végétation/environnement 63

23 Classification de l'''utilisation actuelle des sols'' utilisée dans les opérations d'inventaire de la FAO 63

3 Interprétation des photographies aériennes classiques en inventaire forestier 69

31 Introduction 69

311 Estimation des surfaces avec, ou sans, cartographie forestière 69

312 Classifications ''obligatoires'' et classifications conçues pour l'inventaire 69

32 Remarques sur les photographies et les couvertures aériennes 70

321 Caractéristiques des photographies aériennes 70

322 Caractéristiques des couvertures aériennes 73

323 Quelques problèmes des missions photographiques aériennes 75

324 Mosaïques 76

33 Photointerprétation 77

331 Qualités d'une bonne photointerprétation 77

332 Interprétation stéréoscopique 77

333 Elaboration des clefs de photointerprétation 78

334 Photointerprétation par points photo et photointerprétation avec délimitation 78

4 Cartographie forestière à partir de photographies aériennes conventionnelles 79

41 Introduction 79

42 Restitution à partir de photographies simples 80

43 Restitution à partir de stéréogrammes 80

Page

5 Estimation des surfaces à partir des photographies aériennes et des cartes 81
51 Remarques préliminaires 81
52 Mesures directes effectuées par planimétrie sur cartes 82
53 Méthodes d'estimation fondées sur les techniques d'échantillonnage 82
531 Estimation des surfaces à partir de cartes 82
532 Estimation des surfaces à partir de photographies 83
54 Estimation continue des surfaces 83
6 Progrès récents des techniques de télédétection et de cartographie 84
61 Aperçu des techniques récentes 84
611 Nouvelles méthodes de télédétection 84
612 Nouvelles formes de reproduction des informations recueillies 87
613 Nouveaux procédés d'analyse des informations recueillies 87
614 L'orthophotographie 88
62 Applications forestières déjà opérationnelles 88
621 Utilisation des radiations en dehors du spectre visible 88
622 Utilisation des plateformes spatiales 89

CHAPITRE V - LES MESURES EN INVENTAIRE FORESTIER 92

1 Introduction 92
2 Mesure des arbres 93
21 Définition des termes 93
22 Comptage 95
221 Comptage dans des unités de superficie donnée 95
222 Comptage dans le cas d'un sondage par points ou par ligne 95
23 Identification des essences 96
24 Mesures 97
241 Unités de mesure 99
242 Classes de mesure 99
243 Appareils et méthodes de mesure 101
3 Estimation des volumes 104
31 Définition des volumes 104
32 Unités de volume 105
33 Classification des techniques d'estimation du volume 106
34 Estimation du volume des arbres 107
341 Formules géométriques utilisées pour des arbres sur pied ou abattus 107
342 Tarifs de cubage mathématiques 108
343 Estimation du volume par des fonctions de décroissance 115
344 Choix de la meilleure technique d'estimation des volumes 116

		Page
4	Evaluation de la qualité	116
41	Remarques préliminaires sur l'évaluation de la qualité	116
411	Définition de l'évaluation qualitative en inventaire forestier	116
412	Evaluation des ''volumes nets'' et utilité de cette notion (eu égard particulièrement aux inventaires des forêts feuillues tropicales hétérogènes)	116
413	Autres applications de l'évaluation qualitative en inventaire forestier	117
42	Méthodes d'évaluation de la qualité	118
421	Estimation des caractéristiques et des défauts externes	118
422	Evaluation des défauts internes	123
5	Etudes de récolement	124
51	Principe	124
52	Problèmes connexes	125
53	Procédure générale	125
531	Phases principales d'une étude de récolement	125
532	Procédure	126
533	Exemple	126
6	Etudes d'accessibilité	128
61	Introduction	128
62	Choix des paramètres d'accessibilité	129
63	Quantification et/ou classification des paramètres d'accessibilité	131
631	Paramètres liés à l'abattage	131
632	Paramètres liés au transport et la construction des routes	132
CHAPITRE VI – RELEVE ET TRAITEMENT DES DONNEES EN INVENTAIRE FORESTIER		137
1	Introduction	137
2	Relevé des données	137
21	Conditions générales	137
22	Conditions particulières	138
221	En fonction du type de données	138
222	En fonction du traitement	140
23	Principaux types de relevés	140
24	Aspects pratiques du relevé	141
241	Organisation sur le terrain	141
242	Préparation pour un traitement futur	141
3	Traitement des données	142
31	Phases du traitement des données	142
311	Saisie des données	142
312	Apurement des données	143
313	Elaboration des résultats	144
314	Présentation des résultats d'inventaire	145
315	Système de traitement	155

Page

313 Elaboration des résultats 144
314 Présentation des résultats d'inventaire 145
315 Système de traitement 155
32 Choix du type de traitement 157
321 Traitement manuel 157
322 Traitement électronique (informatique) des données 158
323 Traitements combinés 160
33 Aspects pratiques du traitement électronique des données 160
331 Traitement intégré 160
332 Sous-traitance 161
333 Quelques remarques sur l'utilisation des programmes standard 163

CHAPITRE VII – CONSIDERATIONS SUR LES DISPOSITIFS D'INVENTAIRE 165

1 Introduction 165
2 Combinaisons photointerprétation/sondage sur le terrain 165
21 Remarques préliminaires 165
22 Surfaces des strates connues exactement ou presque 166
23 Surfaces des strates estimées par sondage 167
231 Estimation des surfaces à partir d'un seul échantillon 167
232 Estimation des surfaces avec correction sur le terrain 171
24 Autres utilisations des dispositifs d'échantillonnage à deux phases 173
3 Considérations sur les dispositifs de sondage sur le terrain 175
31 Distribution de l'échantillon 176
311 Echantillonnage avec ou sans stratification 176
312 Echantillonnage aléatoire ou systématique 176
313 Echantillonnage à un ou à plusieurs degrés 177
314 Echantillonnage avec probabilités égales ou inégales 178
315 Utilisation d'un paramètre auxiliaire 178
32 Caractéristiques des unités d'échantillonnage 178
321 Echantillon de placeaux ou de points 178
322 Taille des unités de sondage 179
323 Forme des unités de sondage 180
4 Inventaire forestier continu 182
41 Définition et utilisation 182
42 Description du dispositif 182
421 Différents types d'inventaires forestiers continus 182
422 Echantillonnage avec renouvellement partiel (SPR) 183
5 Sondage séquentiel 186

ANNEXE I – EXEMPLE DE SPECIFICATIONS TECHNIQUES à prévoir dans un contrat de couverture aérienne 188

ANNEXE II – BIBLIOGRAPHIE SELECTIONNEE ET ANNOTEE 194

CHAPITRE I

INTRODUCTION

CHAPITRE I

INTRODUCTION

1. Historique

Du 11 au 22 septembre 1967, les experts en inventaire forestier des projets du Fonds spécial des Nations Unies se sont réunis au Siège de la FAO à Rome 1/. Il s'agissait d'améliorer les opérations d'inventaire de la FAO avec, en vue, les quatre principaux objectifs suivants:

1) A la lumière de l'expérience acquise, définir plus clairement les informations de base dont la connaissance est indispensable pour guider les investissements dans les industries forestières et en tenir compte dans les inventaires en cours et futurs.

2) Rendre plus homogènes et plus uniformes les résultats d'inventaire tout en laissant la possibilité de relever au besoin des données spéciales pour tenir compte de conditions locales particulières. Ceci faciliterait la comparaison et la synthèse de résultats d'inventaires différents.

3) Rationaliser les opérations d'inventaire de manière à ce que les renseignements sur les ressources forestières soient plus sûrs et plus complets et obtenus à un moindre coût.

4) Intensifier la coopération entre les spécialistes en inventaire forestier d'une part et les utilisateurs des inventaires d'autre part, pour mieux adapter les informations obtenues aux besoins.

A la suite de cette réunion, il a été recommandé d'écrire un manuel afin d'aider les experts en inventaire dans la préparation et l'exécution de leurs travaux.

La première édition du manuel est due à M. B. Husch, ancien Chef de la Section de l'évaluation des ressources forestières au Département des forêts de la FAO; elle reprenait les propositions des experts.

Dans cette première édition, il était spécifié qu''''un manuel de ce type doit être un document de travail susceptible d'être modifié périodiquement et d'être révisé afin d'y inclure les amélionrations qui apparaîtraient nécessaires lors de son utilisation''. Une révision du manuel a été entreprise en 1972. Un questionnaire fut envoyé à un certain nombre de spécialistes d'inventaire qui ont été invités à formuler critiques et suggestions. La plupart d'entre eux ont répondu et nous ont fait des propositions utiles sur les renseignements que devait contenir cette nouvelle édition et en particulier sur la définition des buts des inventaires,la précision des mesures et les méthodes de traitement des informations. Nous voulons leur exprimer ici nos vifs remerciements pour leur aimable collaboration qui a facilité notre tâche et nous a permis d'éviter certaines graves omissions.

2. Principales caractéristiques de cette nouvelle édition

a) Ce document est un manuel. Son but n'est pas d'épuiser la question des inventaires forestiers mais d'énumérer et de décrire brièvement les principales techniques utilisées dans ce domaine important de l'activité forestière tout en donnant des conseils sur leur utilisation. Il ne cherche pas à donner des instructions détaillées à l'usage des techniciens et des ouvriers car chaque inventaire a ses besoins spécifiques dans ce domaine et nécessite des instruction particulières.

1/ Le compte rendu de cette réunion figure dans le document FO: SF/7, IM du 9 octobre 1967 intitulé: ''Report of the Headquarters Meeting of Forest Inventory Experts on UNDP/SF Projects''

Ce manuel ne peut naturellement pas satisfaire tous les besoins et un certain nombre de points d'interrogation ne seront pas levés. Il devra être complété par d'autres sources, telles que livres et périodiques de statistiques et de foresterie, rapports d'inventaires, ainsi que par des réflexions et des recherches personnelles. Chaque opération d'inventaire, avec ses buts et ses besoins, doit avoir une certaine spécificité. On ne peut imaginer un livre unique valable universellement.

b) Dans sa première édition, le manuel s'appelait: ''Manuel pour les opérations d'inventaire forestier réalisées par la FAO''. On ne peut dire, cependant, que les opération de la FAO diffèrent beaucoup de celles d'organismes publics ou de sociétés privées et ce manuel rend compte de techniques d'inventaire forestier utilisées par des spécialistes en dehors de la FAO. De plus, on doit tenir compte du rôle joué par la FAO dans l'élaboration et la vulgarisation de l'information, ce manuel pouvant donc être utilisé non seulement au sein de ses opérations d'inventaire mais aussi dans de nombreux pays en développement où des experts compétents manquent. C'est pourquoi les opérations d'inventaire de la FAO ne sont pas évoquées dans le nouveau titre.

c) Les inventaires réalisés par la FAO ou par des pays en voie de développement ont été effectués, pour la plupart, dans des régions tropicales. Bien que ce manuel traite d'inventaires forestiers en général, on a mis l'accent sur les inventaires des forêts tropicales feuillues. Ceux-ci intéressent en effet tout particulièrement la majorité des pays en développement. Certaines techniques intéressantes utilisées dans les zones tempérées, comme les mesures photogrammétriques, les tarifs de cubage ''photographiques'', et les méthodes d'échantillonnage par points, du fait qu'elles présentent moins d'intérêt pour les forêts tropicales, ne sont décrites que brièvement. Cependant, ces techniques peuvent acquérir une importance croissante pour les plantations et pour les peuplements naturels homogènes situés dans de nombreux pays en développement.

d) Pratiquement tous les inventaires forestiers dans des pays en développement sont réalisés afin d'évaluer les ressources en bois, et plus particulièrement d'estimer les volumes bruts, de déterminer les qualités et le rendement des bois sur pied. On ne peut cependant pas oublier qu'il peut exister d'autres informations à rassembler et d'autres paramètres à estimer selon les buts spécifiques de l'inventaire.

CHAPITRE II

BUTS ET PLAN D'UN INVENTAIRE FORESTIER

CHAPITRE II

BUTS ET PLAN D'UN INVENTAIRE FORESTIER

Les composantes principales et la programmation d'un inventaire forestier dépendent des buts de l'opération. Les buts et l'exécution sont interdépendants: les buts doivent être définis clairement et le dispositif doit être choisi de façon à les réaliser. C'est pourquoi buts et planification sont réunis dans ce chapitre. Des informations plus complètes sur ce sujet peuvent être trouvées dans l'étude "Préparation d'un Inventaire Forestier" de B. Husch (Etudes de Forêts et de Produits Forestiers de la FAO, N° 17).

1 Buts de l'inventaire

11 Introduction

Il est capital de définir clairement les divers objectifs de l'inventaire proposé ainsi que leur importance relative afin d'adapter au mieux le plan et le mode d'exécution. Il faut tenir compte, d'autre part, des contraintes et limites inévitables telles que les délais imposés et les crédits disponibles, ainsi que la qualification du personnel.

Les personnes responsables de la conception et de la réalisation des inventaires sont souvent critiquées parce qu'elles entreprennent ce travail sans avoir une idée claire des objectifs à atteindre et ne présentent ainsi aux forestiers, économistes, sylviculteurs et industriels qu'une information incomplète, voire inutile.

Parfois, une étude approfondie du problème peut montrer qu'un inventaire ne répondra pas aux buts recherchés. Une analyse des coûts et des bénéfices peut aussi aboutir à la conclusion qu'un inventaire forestier, du fait de ses contraintes et de ses limites, n'est pas l'outil le plus adéquat pour appréhender l'information recherchée. Le regroupement des renseignements disponibles, la comparaison avec des forêts semblables déjà inventoriées et l'utilisation de résultats de recherches permettent parfois d'obtenir à moindres frais le degré de précision requis.

Il peut y avoir, au même moment et dans un même pays, une demande pour différentes catégories d'inventaire comme, par exemple, inventaires nationaux, inventaires de grandes unités forestières (par exemple 100 000 ha de forêts) ou inventaires de petites unités pour la préparation de plans d'aménagement. Et il ne faut pas s'attendre, par exemple, à pouvoir élaborer un plan détaillé d'aménagement local d'après les données recueillies au niveau d'un inventaire forestier national. Cela doit être signalé aux administrateurs qui pensent parfois qu'un type d'inventaire unique leur fournira toutes les informations qu'ils recherchent, à tous les niveaux. En général, faute de moyens, la priorité doit être donnée au type d'inventaire qui permettra de résoudre les problèmes les plus urgents.

Une étude soigneuse peut parfois montrer que l'opération la plus utile est une combinaison d'inventaires partiels effectués à des niveaux différents. Récemment, alors qu'un inventaire forestier national avait été demandé au PNUD, on a décidé d'effectuer plutôt la série d'opérations suivante:

- reconnaissance par photo-interprétation avec échantillonage sur le terrain de quelques parcelles de reconnaissance au sol, afin d'estimer les surfaces couvertes par chaque type de végétation et par chaque type de forêt;

- cartographie de la végétation d'un certain nombre de réserves forestières, complétée par une étude au sol permettant l'estimation globale du matériel sur pied de chaque type de forêt;

- inventaire intensif, avec cartographie de la végétation, des zones forestières les plus riches.

Cet exemple montre qu'un programme d'inventaire forestier peut comprendre différentes sortes d'inventaire pour faire face à différents objectifs.

12 Définition des objectifs

121 Les objectifs doivent être définis conjointement par ceux qui utiliseront les résultats de l'inventaire (par exemple les responsables forestiers, les aménagistes) et par le spécialiste en inventaires, et non pas seulement par ce dernier. Le spécialiste doit mettre au point un inventaire capable de fournir aux utilisateurs les renseignements nécessaires sous la forme voulue et avec la précision requise. Cette coopération avec les utilisateurs potentiels est essentielle depuis la préparation de l'inventaire jusqu'à la remise des résultats finals.

En ce qui concerne cette coopération, deux problèmes peuvent se présenter:

a) Dans certains cas, le spécialiste doit préparer l'inventaire sans l'aide des utilisateurs, soit que ceux-ci soient absents, soit qu'ils n'aient pas une idée précise sur l'information recherchée. Par exemple, dans un projet de développement forestier, les consultants en aménagement, en économie ou en exploitation peuvent n'arriver qu'une fois l'inventaire commencé ou même fini car ils ne peuvent travailler d'une façon valable qu'avec les renseignements donnés par l'inventaire. Habituellement ils ne participent pas à la préparation de l'inventaire, ce qui explique que parfois l'information fournie par celui-ci soit insuffisante. Pour éviter ce contretemps, il faudrait recueillir les avis du plus grand nombre possible d'utilisateurs, faire des comparaisons avec d'autres inventaires semblables déjà réalisés et, au besoin, consulter, au moment où l'on choisit le dispositif de l'inventaire, les spécialistes des autres disciplines.

b) Un autre problème se pose du fait que les buts de l'inventaire peuvent changer. Les objectifs définis au stade de la préparation peuvent varier en cours d'opération. Cela se produit, par exemple, lorsqu'il y a modification de la taille unitaire des blocs pour lesquels les résultats doivent être obtenus avec une précision donnée. Cela est aussi vrai pour de longs programmes d'inventaire forestier au niveau national. Il n'existe pas de solution générale à ce problème; tout ce que l'on peut dire, c'est que plus le dispositif initial est souple, plus les modifications seront faciles. De plus, on devrait essayer de prévoir certains de ces changements lors de la préparation du dispositif.

122 Priorité des objectifs. Tous les objectifs n'ont pas la même importance. Certains sont fondamentaux et peuvent justifier l'inventaire à eux seuls. Les informations correspondantes doivent être données sous la forme voulue sinon l'opération manque son but. Le degré de précision de l'information fournie est aussi un facteur très important. D'un autre côté, il peut arriver qu'un objectif secondaire ne soit réalisé que de façon approximative (par exemple, avec une précision moindre).

Il faut évaluer soigneusement la priorité des objectifs à réaliser avant de décider du dispositif d'inventaire. Si, par exemple, l'estimation des surfaces est plus importante que celle des volumes, on fera une plus large place à l'étude des cartes et des documents de télédétection qu'aux mesures dendrométriques sur les photographies ou au sol. De même, il peut être nécessaire de choisir des zones ou blocs prioritaires dans les régions inventoriées. Du point de vue de l'estimation du volume, toutes les essences n'ont pas la même valeur économique, si bien que l'inventaire sera conçu de façon à donner les résultats avec une précision spécifique pour les essences les plus importantes: les volumes d'essences secondaires isolées pourront être estimés avec moins de précision surtout si celles-ci sont faiblement représentées et inégalement réparties.

123 Autres besoins. Les inventaires forestiers exigent le plus souvent beaucoup de travail sur le terrain -d'où des dépenses importantes et une logistique relativement difficile. En particulier le rapport du coût d'accès aux parcelles d'échantillonnage au coût de rassemblement des données, est parfois très élevé. Le coût supplémentaire

qu'entraîneraient la mesure et l'enregistrement d'autres paramètres sans relation directe avec le but de l'inventaire peut ne pas être significatif. Dans ces conditions, il peut être recommandé de profiter des travaux d'inventaire pour recueillir des données utiles à d'autres spécialistes que ceux qu'intéresse le but principal de l'inventaire (pédologues, dendrologistes, phytosociologues, etc.). Cela est d'autant plus justifié qu'un inventaire forestier est souvent la méthode la plus objective et la plus complète pour explorer des régions inconnues et isolées.

Il n'y a pas de réponse unique à ce problème, et chaque opération d'inventaire est un cas particulier. De nombreux points doivent être pris en considération, parmi lesquels on peut citer (a) les dépenses nécessaires pour recueillir ces données supplémentaires et (b) la qualification et l'expérience du personnel de terrain pour ce travail supplémentaire ainsi que la précision et la valeur correspondantes des données recueillies.

Même si elles ne sont pas explicitement nécessaires au but de l'inventaire, certaines données doivent être recueillies systématiquement car elles sont reconnues comme étant utiles dans tous les cas. Dans les inventaires de forêts tropicales, ces données sont les suivantes:

- données concernant les conditions d'exploitation, c'est-à-dire pentes, portance du sol, obstacles, sous-bois, marécages, etc.;

- nombre d'arbres par essences et par classes de diamètre au-dessus d'un diamètre minimal (par exemple 10 cm) dans un sous-échantillon de parcelles, si seules certaines essences commerciales doivent être inventoriées dans l'échantillon principal;

- nombre de semis et gaulis des essences les plus importantes dans un sous-échantillon de parcelles, en vue d'études ultérieures sur la régénération et l'aménagement.

D'autres renseignements, quoique sans rapport direct avec les buts d'un inventaire forestier, peuvent facilement être relevés soit au bureau (comme les données climatiques) soit sur le terrain (comme les conditions de récolte des graines pour chaque essence, le degré de dominance des cimes, les dates et la périodicité des fructifications, etc.).

En tout cas, le personnel d'inventaire doit étudier dans un esprit positif les demandes faites de renseignements additionnels. Le mieux serait probablement d'inviter chercheurs et spécialistes ou leurs collaborateurs à se joindre au personnel d'inventaire pour recueillir leurs propres données. Cette solution serait la plus économique car les données rassemblées auraient plus de valeur et les dépenses de l'infrastructure seraient partagées entre les deux parties.

124 Indications capitales pour un inventaire forestier

i) les limites et les dimensions exactes des zones à inventorier (les décisions à ce niveau seront facilitées par l'existence de documents récents - cartes topographiques, cartes de l'utilisation des sols, documents de la télédétection).

ii) Subdivisions de cette zone à prendre en considération: ce point est primordial car la qualité de l'inventaire dépend de la dimension finale de la subdivision forestière pour laquelle les résultats sont demandés avec une précision donnée (ces classifications excluent les stratifications effectuées à la seule fin d'améliorer la précision des résultats pour lesdites unités); ces subdivisions peuvent être:

- fondées sur des relations bioclimatiques (comme, par exemple, une classification selon la vocation des terres);

- en relation avec l'utilisation du sol et la végétation actuels;

- en relation avec un critère d'aménagement forestier, tel que:

  régime foncier et type de propriété
  administration
  géomorphologie et accessibilité
  protection (zones de drainage)
  autres critères d'aménagement, par exemple blocs d'exploitation

- combinaison de deux ou plusieurs critères de classification.

iii) Nature de l'information recherchée: l'information peut être graphique (cartes, mosaïques, graphiques, tableaux, etc.), descriptive (description qualitative des types de forêt par exemple) ou quantitative.

En ce qui concerne l'information graphique certains caractères tels que l'échelle et la résolution - dimensions de la plus petite délimitation correspondant à un type forestier figurant sur la carte - doivent être définis. La résolution est en rapport avec la précision de l'information recherchée.

Pour les résultats quantitatifs on peut considérer les points suivants:

- correspondent-ils à une évaluation statique et/ou dynamique? (c'est-à-dire se rapportent-ils uniquement au moment de l'inventaire ou concernent-ils l'évolution de la forêt?);

- sont-ils des moyennes par unité de surface (ha) (ou, pour certaines forêts, par arbre) ou des totaux?

- les résultats finaux sont-ils des surfaces, des nombres d'arbres, des volumes, des poids (par exemple dans les inventaires forestiers papetiers), des prix (en tenant compte des prix unitaires des produits)?

iv) Présentation de l'information recherchée: une fois que l'on sait quel genre de renseignements on cherche, et avec quelle précision, on peut décider comment seront présentés les résultats. Ainsi, on pourra établir un avant-projet de tabulation et le présenter aux utilisateurs pour approbation. Ce point est essentiel car la clarté et la rapidité d'accès aux résultats sont deux qualités importantes pour un rapport d'inventaire. De plus, à ce niveau, le dialogue avec les responsables de l'inventaire permet parfois aux utilisateurs de mieux définir leurs objectifs.

Une série de modèles de tableaux des résultats quantitatifs concernant les surfaces et les volumes, considérés comme l'information minimale de base dans tous les inventaires forestiers de la FAO, a été élaborée en 1967 lors de la réunion d'experts à Rome. Le but de ce travail était d'harmoniser la présentation des résultats pour les opérations réalisées par la FAO (et de faciliter ainsi, en particulier, le recensement périodique des ressources forestières aux niveaux national, régional et mondial). Ces tableaux sont reproduits au chapitre VI ci-dessous, qui traite des problèmes de relevé et d'analyse des inventaires forestiers.

On ne peut prévoir, dans un avenir proche, une standardisation des tableaux récapitulatifs de tous les inventaires forestiers. Cependant, le travail serait de beaucoup facilité si l'on suivait le plus souvent possible les modèles de tableaux présentés au chapitre VI, en les complétant au besoin par d'autres tableaux.

v) Précision de l'information recherchée: la précision voulue pour les principaux paramètres doit être déterminée avant l'inventaire. Pour certains autres paramètres, la précision recherchée n'aura pas à être déterminée exactement mais ne devrait pas dépasser une certaine limite. A propos de la précision, trois points importants doivent être pris en considération:

a) l'erreur totale d'une estimation par échantillonnage a deux composantes:

- l'une est l'erreur d'échantillonnage calculée à partir des valeurs mesurées dans les unités d'échantillonnage et qui correspond à la précision au sens proprement statistique;

- la deuxième est le biais qui peut venir soit de la méthode d'échantillonnage, soit de la méthode d'estimation, soit des erreurs de mesure (pour l'analyse du biais dans l'échantillonnage, voir le paragraphe 24 du chapitre III). Le biais peut dépasser parfois largement l'erreur d'échantillonnage 1/ qui est souvent et, à tort, seule prise en considération. En général, lorsqu'on parle de la précision d'une estimation, on doit se référer non seulement à l'erreur d'échantillonnage mais aussi à l'erreur totale. On doit essayer d'estimer celle-ci en utilisant les procédés particuliers et objectifs de vérification et de prévoir un dispositif tel que cette erreur totale ne dépasse pas l'erreur tolérée. C'est là un des problèmes les plus délicats et, malheureusement, l'un des moins étudiés dans les livres et les rapports d'inventaires.

b) La précision exigée dans tous les dispositifs d'échantillonnage doit être donnée à un certain niveau de probabilité. La signification et le choix d'un niveau de probabilité ne sont pas bien perçus par les utilisateurs, mais ont une influence considérable sur l'intensité des travaux d'inventaire. Chaque fois que cela sera nécessaire, ce point devra être bien défini avant la préparation de l'inventaire.

c) La précision demandée doit se rapporter à une population donnée qui peut être soit la totalité de la surface inventoriée soit une subdivision (unités administratives, types de formation, parcelles, bassins versants, blocs d'exploitation). La taille moyenne de ces divisions influe beaucoup sur l'intensité des travaux d'inventaire.

Il est préférable de donner au moins pour chaque résultat final l'erreur d'échantillonnage correspondante. Il arrive souvent qu'on ne détermine pas la précision des résultats secondaires, afin de réduire le coût du traitement des données. Cependant, la précision de certains chiffres peut être très faible à cause de la variabilité élevée des paramètres. Il est nécessaire de signaler leur faible précision ou de les éliminer complètement (si, par exemple, il s'agit du volume d'une essence faiblement représentée, le chiffre pourra être regroupé avec ceux d'autres essences pour obtenir un chiffre global suffisamment précis).

2 Canevas pour l'élaboration des plans d'inventaire

On trouvera ci-dessous l'exemple d'un canevas qui peut être utilisé dans la préparation d'un inventaire forestier. Il convient de reconnaître qu'aucun canevas de ce genre ne peut être universellement valable, et que le programme à suivre varie en fonction de chaque inventaire. Ce qu'il est important de reconnaître c'est la nécessité de preparer un plan écrit et de prendre en considération tous les points mentionnés ci-après. Les points évoqués dans le sous-chapitre précédent sont résumés sous le premier titre: ''Buts de l'inventaire''.

I. Buts de l'inventaire

a) Définition générale des objectifs conjointement avec les utilisateurs des résultats.

b) Priorité des objectifs.

1/ Surtout dans les inventaires complets (taux d'échantillonnage = 100%) où, par définition, l'erreur d'échantillonnage est nulle.

c) Autres besoins (devant être discutés avec les spécialistes intéressés: pédologues, écologistes, botanistes, etc.).

d) Définitions détaillées des objectifs:

- limites et dimension exactes de la zone à inventorier;
- subdivisions à y envisager;
- nature de l'information recherchée;
- présentation de l'information recherchée;
- précision de l'information recherchée.

II. Renseignements généraux

a) Autorités responsables de l'inventaire et autres organismes qui y collaborent.

b) Informations et données disponibles sur la zone à inventorier d'après des prospections, rapports, cartes ou documents de télédétection existants, dans les domaines suivants:

- description générale de la forêt
- variabilité des paramètres à mesurer
- état du terrain, accessibilité, facilités de transport

c) Ressources disponibles pour la réalisation de l'inventaire.

III. Dispositif d'inventaire

a) Plan du dispositif d'inventaire à utiliser.

b) Description générale des diverses phases.

i) prises de vues aériennes, interprétation des éléments de télédétection
ii) cartographie et estimation des surfaces
iii) dénombrement complet ou méthodes d'échantillonnage pour le relevé des paramètres forestiers
iv) relations à utiliser pour exprimer les données quantitatives estimées des peuplements (par exemple tarifs de cubage)

IV. Mesures

a) Description du plan de sondage à utiliser au bureau et sur le terrain: en particulier, taille, forme, nombre et distribution des unités d'échantillonnage pour aboutir à la précision recherchée.

b) Procédés d'interprétation des documents de télédétection:

i) instructions détaillées sur toutes les techniques;
ii) description et répartition des tâches;
iii) instruments;
iv) fiches et enregistrements des observations;

c) Organisation sur le terrain:

i) organisation des équipes et description des tâches;
ii) modes de transport et instructions;
iii) directives pour le campement;
iv) soutien logistique.

d) Procédures sur le terrain dont certaines détaillées pour:

i) la localisation des unités d'échantillonnage;
ii) l'implantation des unités d'échantillonnage;
iii) les mesures dans les unités d'échantillonnage;
iv) les instruments et leur mode d'emploi;
v) les mesures dendrométriques et autres;
vi) d'autres mesures sur le terrain telles que accroissement, dommages causés par les insectes, mortalité, conditions pédologiques et topographiques, conditions de récolte de graines et renseignements sur les rôles non productifs des forêts;
vii) le modèle des feuilles de pointage et l'enregistrement des observations.

V. Méthodes de compilation

a) Instructions détaillées sur le traitement des données provenant des documents de télédétection et des mesures sur le terrain:

i) formules pour estimer les moyennes, les totaux et les erreurs d'échantillonnage;
ii) relation à utiliser pour convertir les mesures sur les documents de télédétection et sur le terrain en expressions quantitatives: soit tarifs de cubage ''photographiques'', tarifs de cubage pour arbres, etc.

b) Méthodes de calcul et compilation:

i) description de la procédure suivie, par exemple calculs à la main ou sur ordinateur, etc.;
ii) description détaillée de toutes les phases du calcul depuis les données de base sur les feuilles de pointage jusqu'aux résultats finaux (pour le traitement électronique, description des entrées, des programmes et des sorties).

VI. Rapport final

a) Sommaire (à noter que le plan d'inventaire peut, avec quelques modifications, servir de base au rapport final).

b) Temps prévu pour la préparation.

c) Responsabilités pour la préparation.

d) Méthodes de reproduction.

e) Nombre d'exemplaires.

f) Diffusion.

CHAPITRE III

TECHNIQUES ELEMENTAIRES DE SONDAGE

CHAPITRE III

TECHNIQUES ELEMENTAIRES DE SONDAGE

1. Introduction

11 L'échantillonnage (ou sondage) en inventaire forestier

111 L'échantillonnage est une technique indispensable utilisée pour des raisons économiques dans la plupart des inventaires forestiers car les populations à inventorier sont généralement trop vastes pour pouvoir être entièrement dénombrées, qu'elles soient composées d'arbres (élaboration de tarifs de cubage, étude des défauts, estimation de données dendrométriques dans les plantations) ou de parcelles.

On peut avoir recours à divers procédés d'échantillonnage au cours des différentes phases d'un même inventaire forestier. Leur utilité principale, mais non la seule, est l'estimation des surfaces et des caractéristiques des peuplements forestiers.

Lorsque l'on parle de dispositif de sondage d'un inventaire forestier, on se réfère généralement à la disposition des échantillons sur le terrain.

Bien que d'autres techniques statistiques puissent être utilisées dans un inventaire forestier, par exemple, l'analyse multivariable (régression) pour l'élaboration de tarifs de cubage, on ne traitera ici que des techniques d'échantillonnage. Les autres techniques statistiques utilisables sont décrites dans des manuels de statistique, dont certains sont cités en bibliographie.

112 L'objectivité dans l'échantillonnage. L'échantillonnage doit être objectif pour ne pas introduire de biais subjectif dans les estimations. Un inventaire forestier qui utilise des parcelles choisies subjectivement (à la suite d'une sélection fondée sur ''l'expérience'' et sur la connaissance de la région forestière) ne peut donner de bonnes estimations car il est alors impossible de connaître l'importance et le signe du biais et de déterminer l'erreur d'échantillonnage. Objectif ne veut pas dire sans biais: on peut décider d'utiliser une estimation biaisée à condition que le biais soit inférieur à une certaine valeur. L'estimation par le quotient est un exemple d'estimation biaisée qui se montre souvent très utile.

Objectivité n'est pas non plus synonyme de hasard. De nombreux échantillonnages systématiques sont objectifs et donnent des estimations sans biais, bien que, dans la plupart des cas, un dispositif systématique ne puisse être assimilé à un dispositif aléatoire. Le seul inconvénient des échantillons systématiques est l'impossibilité d'appliquer la théorie des sondages pour estimer sans biais les erreurs d'échantillonnage.

113 Choix du plan de sondage. En théorie, le dispositif le plus efficace est celui qui donne les estimations les plus précises pour un prix de revient donné, ou qui, pour un certain degré de précision des estimations, coûte le moins cher. Quand on parle de ''précision'' il faut envisager non seulement les erreurs d'échantillonnage mais aussi les biais constants et variables (voir paragraphe 24 ci-dessous). L'évaluation du coût devrait être aussi détaillée que possible. Dans de nombreux cas, il est très difficile de réaliser une étude complète et précise de l'efficacité et de déterminer le modèle d'échantillonnage le plus efficace. Des calculs approximatifs qui ne tiennent compte que des erreurs d'échantillonnage et des coûts permettent d'identifier le dispositif optimum dans le cadre de cette hypothèse simplificative.

Mais le choix du plan de sondage ne doit pas se fonder uniquement sur ce calcul partiel appuyé sur la théorie de l'échantillonnage et sur les données disponibles relatives aux coûts. L'influence des erreurs de mesure, dont on ne peut tenir compte, en général, dans les calculs d'efficacité, doit être réduite au maximum. C'est pourquoi les travaux du personnel subalterne,

surtout sur le terrain, doivent être faciles et simples, ainsi que leur contrôle. Ceci est très important et ne doit pas être perdu de vue lorsque l'on choisit le(s) plan(s) de sondage. Toutes les dispositions possibles doivent être prises pour améliorer la fiabilité des données, même si cela aboutit à une légère augmentation de l'erreur d'échantillonnage et/ou des coûts.

114 Importance relative des techniques d'échantillonnage en inventaire forestier. On voit d'après le paragraphe ci-dessus que, si l'on veut obtenir des résultats à la fois précis et fiables, il faut considérer ensemble la méthodologie et les conditions pratiques de l'inventaire.

De plus, la photo-interprétation et certaines techniques dendrométriques qui font peu, ou pas du tout, appel à la théorie des sondages sont fondamentales en inventaire forestier; par exemple, classification des types de forêt, estimation du volume des arbres sur pied, évaluation des défauts, etc. Les techniques de sondage peuvent ainsi être considérées seulement comme un des moyens mis en oeuvre pour réaliser un inventaire forestier et leur importance ne doit pas être surestimée. Cependant les forestiers s'occupant d'inventaires doivent avoir des connaissances de base dans ce domaine - c'est pourquoi un chapitre entier de ce manuel est consacré aux techniques de sondage. La sûreté et la validité des résultats d'inventaire ne dépendent pas seulement des techniques de sondage; des inventaires qui utilisent des plans de sondage perfectionnés peuvent donner des résultats peu fiables et inutilisables alors que des inventaires précis et efficaces peuvent être caractérisés par des plans de sondage simples.

12 Plan du chapitre

Il faut tout d'abord définir les concepts statistiques les plus utiles et décrire comment ils doivent être utilisés en inventaire forestier. Les notions mathématiques et statistiques de base qui sont couramment utilisées en échantillonnage (distribution normale, variance de fonctions de variables, estimation par le quotient, optimisation d'un plan de sondage) seront données ensuite. Enfin, on présente les quelques plans de sondage classiques les plus souvent utilisés en inventaire forestier avec les formules correspondantes pour estimer la valeur moyenne d'un paramètre par unité de sondage et son erreur d'échantillonnage.

2. Concepts statistiques 1/

21 Population

Une population est un agrégat d'unités (ou d'éléments) de même nature, dont on doit donner clairement la définition. Par exemple, une forêt est considérée comme le groupement d'un nombre fini de parcelles contiguës de taille égale ou inégale, ou comme l'agrégat de tous les arbres vivants de la forêt (cette définition étant utile pour les inventaires de plantations); une zone cartographiée est considérée comme l'agrégat d'une infinité de points lorsque l'on estime la superficie de la région par un sondage par grille de points.

Il est important de prendre en considération les deux points suivants:

- la population peut avoir un nombre fini ou infini d'unités, et dans ces deux cas la définition de l'unité doit être suffisamment précise pour que l'on puisse déterminer sans ambiguité si une unité donnée appartient ou non à la population;

- les unités sont de même nature mais ne sont pas nécessairement de même taille: par exemple, chaque unité peut être bloc forestier, la population entière étant une grande surface forestière; une unité peut être, aussi, une partie variable (ou sous-parcelle) d'une parcelle, si les parcelles sont réparties dans une zone partiellement boisée (dans ce dernier cas, la population est la partie boisée de la zone).

1/ Le terme paramètre sera utilisé dans le manuel pour indiquer toute variable d'une population qui doit être estimée par sondage

On peut faire les remarques suivantes sur la notion de population:

i) Le terme ''population'' a une définition statistique plus précise que dans le langage commun. Il n'y a par exemple qu'une population d'italiens habitant l'Italie, mais il est utile, dans une étude démographique de cette population, de définir plusieurs populations statistiques qui ont la même taille globale, mais dont les unités n'ont pas les mêmes caractéristiques: l'unité d'une de ces populations statistiques peut être la famille, une autre pourrait être composée de groupes de personnes habitant un même bâtiment, etc.

ii) Parfois, le terme population se rapporte à l'ensemble des valeurs d'un des paramètres à estimer par l'inventaire plutôt qu'à l'ensemble des unités elles-mêmes; nous pensons que, sauf spécification contraire, la population devrait être considérée comme l'ensemble des unités puisque ce sont les unités et non les valeurs du paramètre qui sont échantillonnées.

iii) Il peut arriver que l'ensemble des unités ne constitue pas la population. Par exemple, si les unités sont des parcelles circulaires, il n'est pas possible, en les rassemblant, de reconstituer toute la population. Bien que l'utilisation de parcelles circulaires soit courante, ce problème ne semble pas avoir été étudié; pour de faibles taux d'échantillonnage et pour de petites parcelles, ce problème a une moindre importance et les formules seront appliquées comme si la forêt tout entière pouvait être constituée par une source de parcelles circulaires.

iv) La population à échantillonner doit être définie clairement avant l'élaboration du plan de sondage. S'il s'agit, par exemple, d'une surface, les limites de cette surface doivent être connues. Deux remarques sont pertinentes à ce sujet:

a) La théorie des sondages ne permet en aucune façon d'estimer la valeur d'un paramètre pour une population si ce paramètre est estimé par échantillonnage dans une partie seulement de la population, ou dans une population différente.

b) Il faut distinguer ''la population totale'' de la ''population de référence''. Prenons un exemple: étant donné une forêt tropicale de 100 000 ha qui est la ''population totale'' à inventorier, on peut prévoir une estimation précise des paramètres moyens par unité de surface pour toute la population ou pour des parties de celle-ci (''blocs'', ''sous-blocs'', ''unités d'aménagement'', etc.), que nous appellerons ''populations de référence''. Il y aura ainsi plusieurs possibilités d'inventaire pour la même ''population totale'' et pour la même précision d'un paramètre donné, selon que cette connaissance est recherchée pour toute la population ou pour des subdivisions de celle-ci (''population de référence''). La définition de la ''population de référence'' est, bien sûr, celle qui joue du point de vue statistique. Cette remarque démontre le besoin de signaler clairement à quels niveaux se situent les résultats désirés dans un inventaire forestier. Parfois, les responsables demandent le recensement d'un massif forestier sans définir la taille des unités pour laquelle ils ont besoin d'une estimation précise des paramètres importants. Ils doivent préciser ce point car la gamme des taux de sondage est très large: un faible taux suffit pour une estimation au niveau du massif entier, des taux très élevés seront nécessaires si les subdivisions utiles sont très petites.

22 Distribution

221 Différents types de valeurs des paramètres dans une unité d'une population. Un paramètre donné prend une valeur dans chaque unité d'une population. Supposons, par exemple, que le paramètre soit le ''nombre de tiges à l'ha de Shorea albida de diamètre supérieur à 10 cm'', que la population soit une forêt dont les unités sont des parcelles de 0,1 ha. Si dans une unité il y a 2 Shorea albida d'un diamètre supérieur à 10 cm, la valeur correspondante du paramètre, pour cette unité, est 20. Ce paramètre prend des valeurs discrètes car les éléments constitutifs (tiges) ne sont pas divisibles.

Si, dans cette population, nous considérons le paramètre "volume brut à l'ha des tiges de Shorea albida dont le diamètre de référence est supérieur à 10 cm, - le volume d'un arbre étant mis en relation avec son diamètre de référence et la hauteur d'après un tarif de cubage - les valeurs de ce paramètre seront continues; en effet, elles seront voisines les unes des autres à cause du grand nombre de combinaisons possibles entre les nombres de tiges d'une part, et leurs diamètres et hauteurs d'autre part.

Dans une unité, la valeur du premier paramètre s'obtient par un comptage alors que pour obtenir le deuxième, il faut un comptage et des mensurations afin d'estimer les volumes par une formule de régression (tarif de cubage).

Un paramètre d'une population est souvent évalué en affectant chaque unité d'échantillonnage à une classe donnée. Supposons que nous voulions calculer par l'interprétation sur photographies aériennes d'une série de parcelles de taille identique, la proportion (en surface) d'une formation forestière donnée à l'intérieur d'une forêt (population). A chaque parcelle, nous ferons correspondre une variable dont la valeur pour la parcelle est:

0 si la parcelle n'appartient pas ou n'appartient que pour une faible part à cette formation
1 si la parcelle appartient en totalité, ou du moins en majeure partie, à cette formation.

La valeur moyenne de cette variable pour toutes les parcelles sondées (qui sera un nombre positif compris entre 0 et 1) est un estimateur de la proportion (en surface) de cette formation forestière dans l'ensemble de la forêt.

Si nous tenons compte de toutes les formations forestières de cette zone, il est très facile de vérifier que la somme des proportions estimées est égale à 1 (et que la variance de cette somme est égale à 0, ce qui est un résultat prévisible, car, quel que soit l'échantillon, la somme de ces moyennes estimées est constante et égale à 1).

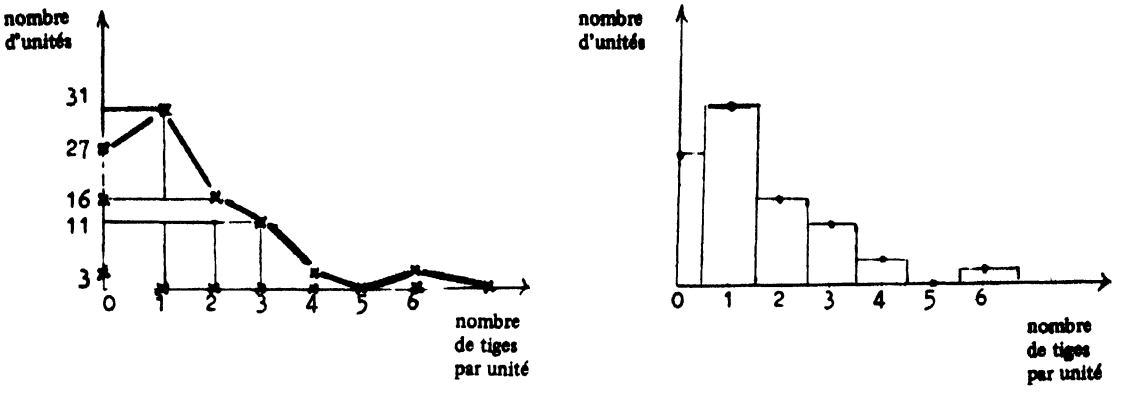
La plupart des remarques qui suivent dans ce chapitre sont valables pour les échantillonnages en vue d'estimer des paramètres résultant aussi bien de mesures que de comptages ou d'affectation. La manière de calculer la variance est la même pour les paramètres continus et pour les variables (0,1) mais les formules résultantes sont différentes, car elles peuvent être simplifiées dans le cas des variables (0,1) utilisées pour l'estimation des proportions.

222 Distribution des valeurs d'un paramètre dans l'ensemble d'une population

Les valeurs du paramètre à estimer dans toutes les unités de la population sont distribuées d'une certaine façon. Supposons que le paramètre ne puisse prendre que les valeurs discrètes dans chaque unité de la population, par exemple lorsqu'il s'agit du nombre de tiges d'une essence donnée. Si nous considérons toutes les unités de la population nous pouvons représenter celle-ci par un diagramme de points (fig. 1) dont les coordonnées sont:

- sur l'axe des x, les nombres de tiges de cette essence dans les unités
- sur l'axe des y, les nombres d'unités de la population ayant un nombre donné de tiges de cette essence (ou fréquence).

Figure 1



Un tel graphique est très souvent représenté sous la forme d'un histogramme: pour chaque valeur du paramètre nous obtiendrons un rectangle dont la hauteur sera la fréquence correspondante.

Dans le cas d'un paramètre continu, nous pouvons grouper l'information en classes de valeurs. Dans ce cas nous obtiendrons aussi un histogramme; plus les classes sont petites, plus les rectangles sont étroits et nombreux.

Nous pouvons imaginer que si la largeur des classes (et, par conséquent, celle des rectangles correspondants) diminue, les points représentatifs sont plus voisins et leur ordonnée diminue également. La distribution peut alors être représentée par une courbe qui relie les points (courbe de distribution).

Il existe un type de distribution des variables continues qui est très utile dans les techniques d'échantillonnage: c'est la distribution normale représentée par une courbe symétrique par rapport à la parallèle à l'axe des y au point d'abcisse de la valeur moyenne du paramètre. Nous verrons que si les estimations des valeurs d'une moyenne obtenue à partir de tous les échantillons du même type ont une distribution ''normale'' autour de la valeur vraie de cette moyenne, il est possible de donner l'erreur d'échantillonnage de cette estimation à un niveau de probabilité donné.

223 Caractéristiques de valeur centrale et de dispersion d'une distribution

Deux caractéristiques de la distribution des valeurs d'un paramètre dans une population offrent un intérêt particulier pour son estimation. Ce sont (en supposant la population finie):

a) la moyenne du paramètre par unité. Si:

x est le paramètre

x_i sa valeur dans la $i^{ième}$ unité

N le nombre total d'unités dans la population

la moyenne $\bar{X}$ du paramètre par unité sera égale à:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^{N} x_i}{N}$$

Nous pouvons aussi écrire: $\bar{X} = \sum_{i'} p_{i'} x_{i'} = E(x)$

où $p_{i'}$ est la probabilité que le paramètre x soit égal à $x_{i'}$, la somme $\sum_{i'}$ étant étendue à toutes les valeurs possibles $x_{i'}$ des unités dans la population

$\bar{X}$ est aussi appelé l'espérance mathématique du paramètre x dans la population; cette valeur s'écrit E(x).

La valeur totale du paramètre dans toute la population est la somme des valeurs du paramètre pour toutes les unités:

$$= \sum_{i=1}^{N} x_i = N\bar{X}$$

b) la variance de la valeur du paramètre est:

$$\sigma_X^2 = \frac{\sum_{i=1}^{N} (x_i - \bar{X})^2}{N}$$

Cette grandeur est une mesure de la dispersion des valeurs du paramètre autour de la valeur moyenne du paramètre.

On peut aussi écrire: $\sigma_X^2 = \sum_{i'} p_{i'} \cdot (x_{i'} - \bar{X})^2 = \sum_{i'} p_{i'} \cdot [x_{i'} - E(x)]^2$

($p_{i'}$, $x_{i'}$ et $\sum_{i'}$ ont la même signification que plus haut).

La variance est aussi l'espérance du carré de la différence entre la valeur du paramètre de la population et la moyenne $\bar{X}$; elle s'écrit

$$\sigma_X^2 = E[x - E(x)]^2$$

La racine carré de la variance est l'écart-type qui est:

$$\sigma_X = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N} (x_i - \bar{X})^2}{N}}$$

L'écart-type n'est pas un nombre pur mais dépend du système d'unités de mesure.

Le coefficient de variation $C_v = \frac{\sigma_X}{\bar{X}}$ est un nombre pur très utile pour caractériser la variabilité d'un paramètre dans une population.

Si nous avons à estimer deux paramètres x et y dans la même population, il est possible de définir une mesure de la liaison entre ces deux paramètres, appelée covariance.

$$\sigma_{XY} = \text{cov}(x,y) = \frac{\sum_{i=1}^{N} (x_i - \bar{X})(y_i - \bar{Y})}{N}$$

y_i et $\bar{Y}$ étant respectivement les valeurs du paramètre y dans la $i^{ème}$ unité et la valeur moyenne de y pour la population entière.

Le coefficient de corrélation ρ entre y et x dans une population, défini par:

$$\rho = \frac{\text{cov}(x,y)}{\sigma_X . \sigma_Y}$$

caractérise la dispersion relative des deux paramètres y et x dans la population (ρ est un nombre pur alors que σ_{XY} dépend des unités choisies pour l'estimation des paramètres x et y).

224 Valeur d'un paramètre par unité de surface dans une unité de population

Comme nous l'avons vu, d'après l'exemple du paragraphe 221, il y a une valeur du paramètre ''nombre de tiges d'une essence donnée à l'ha'' pour chaque unité de surface de forêt. Ce paramètre a une valeur moyenne pour toutes les unités de la population qui est le nombre moyen de tiges de cette essence à l'ha. Afin d'éviter toute confusion, nous recommandons d'utiliser l'expression complète ''valeur moyenne par unité de surface'' pour désigner la valeur moyenne du paramètre par unité (de population) ramenée à l'unité de surface. Si toutes les unités de la population ont la même surface (dimension), la valeur moyenne par unité de surface est aussi égale à la moyenne des valeurs par unité de surface pour toutes les unités de population.

23 Echantillonnage

Comme, dans la plupart des cas, la population à étudier est trop importante pour qu'un dénombrement exhaustif ou des mesures complètes soient possibles, on ne peut réaliser ce travail que pour certaines unités de cette population: on dit qu'on fait un échantillonnage, les éléments choisis étant les unités d'échantillonnage, et l'ensemble des unités d'échantillonnage étant l'échantillon. Si on respecte certaines méthodes de sélection, les techniques d'échantillonnage sont utiles:

i) pour estimer, pour un paramètre donné, les valeurs vraies de la moyenne et du total sur l'ensemble de la population, à partir des valeurs de ce paramètre dans les unités d'échantillonnage.

ii) pour estimer l'erreur d'échantillonnage (précision - intervalles de confiance) à un certain niveau de probabilité, sur les estimations de la moyenne et du total données par l'échantillon.

L'estimation de l'erreur d'échantillonnage est parfois très difficile et, dans certains cas, les formules utilisées ne sont qu'approximatives. D'où l'intérêt d'utiliser, le plus souvent possible, des dispositifs d'échantillonnage simples.

Certains concepts en relation avec l'échantillonnage doivent être définis précisément.

231 Taille de l'échantillon

Etant donné une unité de taille qui peut être un élément ou un individu (tel qu'un arbre), ou une quantité unitaire (telle qu'un hectare), les tailles d'une population donnée et de chacune de ses unités doivent être mesurables. Les unités de la population peuvent avoir des tailles différentes: c'est le cas d'une forêt qui a des limites curvilignes et dont les unités sont des bandes de même largeur mais de longueurs différentes. La taille est ici exprimée, comme dans de nombreux inventaires forestiers, en termes de surface.

La taille de l'échantillon est la somme des tailles des unités d'échantillonnage.

L'intensité d'échantillonnage (ou le taux d'échantillonnage) est égale au rapport de la taille de l'échantillon à la taille totale de la population. Si cette population a N unités de même taille et si l'échantillon est constitué de n unités d'échantillonnage différentes, le taux de sondage f est alors égal à:

$$f = \frac{n}{N}$$

Dans ce cas (unités égales) on peut dire que n est la taille de l'échantillon. Un problème se pose lorsque l'unité est un point et n'a ainsi pas de dimension. Ce cas se présente lorsqu'on estime la proportion de la surface d'une formation forestière par rapport à la surface totale inventoriée, en utilisant une grille de points posée sur une carte forestière, ou lorsque le forestier utilise une méthode d'échantillonnage par points (voir paragraphe 422.2). Le taux d'échantillonnage dans le premier cas est négligeable alors que dans le deuxième cas l'intensité d'échantillonnage varie avec les caractéristiques des arbres (surface terrière, diamètre, carré de la hauteur, hauteur): s'il s'agit d'un sondage horizontal par points (horizontal point sampling), le taux de sondage des arbres de 56 cm de diamètre sera exactement égal à 4 fois le taux de sondage des arbres de 28 cm de diamètre. En général, même pour les arbres les plus gros et les plus hauts, ce taux d'échantillonnage est petit et peut être négligé dans le calcul de l'erreur.

232 Précision et erreur d'échantillonnage. L'estimation de la valeur moyenne ou totale d'un paramètre obtenue à partir d'un échantillon, diffère, en général, de la valeur réelle correspondante pour toute la population. L'échantillon sera d'autant meilleur que l'estimation sera plus précise, c'est-à-dire se rapprochera de la valeur vraie. Cette précision ne peut être exprimée d'une manière absolue, comme dans la phrase suivante: ''la précision de l'estimation de la moyenne de ce paramètre dans la population est ± 3%''. Elle peut cependant être exprimée en termes probabilistes et s'appelle alors erreur d'échantillonnage (ou de sondage). Dans l'exemple précédent, la précision est dite égale à ± 3% à un seuil de probabilité donné. Si nous disons ''au seuil de probabilité P = 0,95'' cela voudra dire que, pour 95% des échantillons semblables tirés de la même population, la moyenne vraie se situera dans un intervalle de ± 3% autour de la moyenne estimée donnée par chaque échantillon. Elle est aussi exprimée en disant: la probabilité que la moyenne vraie soit comprise à l'intérieur de l'intervalle de confiance ± 3% est de 0,95, ce qui équivaut à dire: la probabilité que la moyenne vraie soit en dehors de cet intervalle est de 0,05. Dans ce cas, la valeur 0,05 évalue le risque acceptable d'erreur, en disant que l'erreur d'échantillonnage est de ± 3% au seuil 0,95. Quel que soit l'échantillonnage, l'erreur d'échantillonnage serait infinie (ou la précision serait nulle) si l'on essayait de l'exprimer à une probabilité de 100%.

Le choix d'un seuil de probabilité auquel correspond l'erreur d'échantillonnage d'une estimation doit être fait par les utilisateurs des inventaires forestiers. Il ne suffit pas d'exiger une précision donnée, le seuil de probabilité doit être spécifié. Une précision égale à ± 10% avec une probabilité de 0,95 (''19 sur 20'') a plus de valeur que la même précision pour P = 0,68 (''2 sur 3''). Nous verrons (paragraphe 31) que dans de nombreux cas, la deuxième précision équivaut à ± 20% au seuil 0,95. Toute précision d'échantillonnage indiquée sans référence à un seuil de probabilité n'a pas de signification.

Pour la raison donnée au paragraphe 31, les seuils les plus utilisés dans les techniques d'échantillonnage sont 0,95 et 0,68 (parfois désignés comme 0,05 et 0,32).

Les erreurs sont données non seulement en pourcentage des résultats exprimés mais aussi en unités de mesure correspondantes. Dans ce cas, il est possible également d'exprimer dans ces unités les ''intervalles de confiance'' à un seuil donné. Si, par exemple, l'estimation d'un volume moyen à l'hectare est 40,0 m^3 et l'erreur d'échantillonnage $\pm$ 5,0% au seuil 0,95 les limites de l'intervalle de confiance seront:

40,0 m^3 - 0,05 x 40,0 m^3 = 38,0 m^3 = limite de confiance inférieure au seuil 0,95

40,0 m^3 + 0,05 x 40,0 m^3 = 42,0 m^3 = limite de confiance supérieure au seuil 0,95

l'intervalle de confiance étant (38,0 - 42,0).

Il y a autant de probabilité que la valeur vraie soit plus petite que la limite inférieure de confiance que plus grande que la limite supérieure de confiance. Dans le cas d'un seuil P =0,95, ceci équivaut à dire que la valeur vraie a une probabilité de 0,025 d'être plus petite que la limite inférieure de confiance et une probabilité de 0,025 d'être plus grande que sa limite supérieure.

Il peut être intéressant de ne lier l'estimation qu'à une seule limite de confiance. Dans le cas où l'estimation est un volume moyen exploitable par hectare de forêt, nous nous intéressons plus au volume minimal probable à un seuil donné. La limite inférieure de confiance au seuil de probabilité s'appelle alors ''l'estimation minimum probable'' (Reliable Minimum Estimate). Si le seuil de probabilité correspondant à cette limite de confiance est P = 0,95 (ou 0,05) le seuil de référence pour cette RME sera de 0,975 (ou 0,025). Ce qui équivaut à dire que la RME aura une probabilité de 0,975 d'être dépassée par la valeur vraie, ou une probabilité de 0,025 de la dépasser.

Dans un inventaire forestier donné plusieurs plans de sondage peuvent être utilisés, un pour l'interprétation des documents fournis par la télédétection (estimation des surfaces), un pour les travaux de terrain (estimation des nombres de tiges), un troisième pour le calcul des volumes (en utilisant un échantillon d'arbres mesurés en détail pour élaborer les tarifs de cubage), etc. et chacun de ces sondages aura sa propre erreur d'échantillonnage qui pourra être en relation avec les autres. L'erreur globale n'est pas une simple sommation des différentes erreurs mais une combinaison de celles-ci. Dans la plupart des cas il est difficile, sinon impossible, d'en faire une estimation correcte. Ceci montre une fois de plus, qu'il faut concevoir des plans d'échantillonnage simples qui fourniront des résultats fiables avec la précision demandée.

233 Autres concepts. Le tirage des unités échantillonnées - ce qu'on appelle l'échantillonnage au sens étroit du terme - doit être fait au hasard: c'est une condition fondamentale pour que s'applique la théorie des sondages. Il n'y a, par exemple, aucune méthode entièrement rigoureuse pour évaluer l'erreur d'une estimation obtenue par un sondage systématique parce que le caractère aléatoire manque. Cela ne signifie pas que l'estimation elle-même soit mauvaise (voir paragraphe 422 ci-dessous).

La probabilité de tirage de l'échantillon

La théorie des sondages ne peut, en principe, s'appliquer que si on connaît la composition et la probabilité de tirage de tous les échantillons possibles correspondant à un plan de sondage donné. En pratique, il suffit de connaître la probabilité de tirage des unités elles-mêmes. La probabilité de tirage d'une unité est la chance qu'elle a d'être choisie pour être incluse dans un échantillon. Cette probabilité est un nombre inférieur à 1, la valeur 1 (certitude) étant la somme des probabilités de tirage de toutes les unités de la population. La probabilité de tirage d'un échantillon de n unités de type donné peut être évaluée à partir des probabilités d'inclusion de chaque unité dans l'échantillon.

Exemples (échantillonnage avec remise):

a) dans un échantillonnage simple aléatoire d'une population de N unités, où toutes les unités ont une probabilité égale de tirage, la probabilité de tirer l'unité i est égale à:

$$P_i = \frac{1}{N} \text{ avec } \sum_{i=1}^{N} P_i = N \frac{1}{N} = 1$$

b) dans un échantillonnage où la probabilité est proportionnelle à la taille M_i de chaque unité (appelé échantillonnage PPS) nous aurons:

$$P_i = \frac{M_i}{M_o} \text{ avec } M_o = \sum_{i=1}^{N} M_i = \text{taille de la population entière}$$

Remise

Lorsque la première unité d'un échantillon a été tirée, deux démarches sont possibles:

- tirer la deuxième unité dans la population après avoir remis la première unité tirée (échantillonnage avec remise);
- ou tirer la deuxième unité dans la population sans y remettre la première unité tirée (échantillonnage sans remise)

(la même procédure étant répétée après chaque tirage jusqu'à la constitution de l'échantillon complet).

Dans l'échantillonnage avec remise, une même unité peut figurer dans l'échantillon plusieurs fois.

La plupart des formules utilisées en pratique ne sont valables que pour l'échantillonnage avec remise, bien que les échantillons soient presque toujours tirés sans remise. Cette approximation est acceptable à condition que le nombre d'unités d'échantillonnage soit relativement petit par rapport au nombre total d'unités dans la population (ou dans la strate, s'il s'agit d'un échantillonnage stratifié - voir paragraphe 411.4).

24 Biais et erreurs de mesure

241 Biais. La notion d'espérance mathématique (voir paragraphe 223 ci-dessus) peut être appliquée à l'estimation donnée par un échantillon. Si $\hat{\mu}$ est l'estimateur d'un paramètre obtenu pour un certain type d'échantillon, et $\hat{\mu}_j$ l'estimateur obtenu par l'échantillon j de ce type, l'espérance de $\hat{\mu}$ est:

$$E(\hat{\mu}) = \sum_j \pi_j \hat{\mu}_j$$

où π_j est la probabilité de tirage de l'échantillon j ($\sum_j \pi_j = 1$), la somme $\sum_j$ s'étendant à tous les échantillons du même type.

L'estimation $\hat{\mu}_j$ fournie par un échantillon de ce type est sans biais ou centrée, si son espérance $E(\hat{\mu})$ est égale à la valeur vraie μ du paramètre sur toute la population: $E(\hat{\mu}) = \mu$.

Si ce n'est pas le cas, l'estimation est biaisée et le biais est égal à la différence entre l'espérance de l'estimation et la valeur réelle du paramètre pour toute la population.

Dans ce cas $E(\hat{\mu}) = m \neq \mu$ avec comme biais: $B = m - \mu$

La notion de biais s'applique aussi aux autres estimations données par un échantillon et, en particulier, à l'estimation de l'erreur de sondage.

1) Supposons que le paramètre μ soit la surface terrière moyenne hectare, $\bar{g}$, de tous les arbres de plus de 10 cm de diamètre dans une plantation donnée, et considérons que nous estimons $\bar{g}$ d'après un échantillon d'arbres. Admettons que la section à hauteur d'homme de tous les arbres soit circulaire mais que le mètre utilisé pour la mesure des diamètres se soit rétréci et indique 21 cm quand le diamètre est en réalité 20 cm, et qu'il n'y ait pas d'autres sources possibles d'erreur.

La surface terrière mesurée g' de chaque arbre sera égale à $(\frac{21}{20})^2$ g = 1,1025 g, g étant sa surface terrière réelle. L'espérance E ($\hat{g}$) de la surface terrière moyenne à l'ha pour tous les échantillons de ce type sera: $\bar{g}'$ = 1,1025 $\bar{g}$.

Ici le biais vaut: B = $\bar{g}'$ - $\bar{g}$ = $\bar{g}$ (1,1025 - 1) = 0,1025 $\bar{g}$

2) Supposons que le paramètre μ soit encore la surface terrière moyenne à l'hectare. $\bar{g}$, de tous les arbres de plus de 10 cm de diamètre dans une forêt donnée. L'échantillon se compose de n unités de tailles inégales tirées avec des probabilités égales. Il n'y a pas d'erreur de mesure.

Un estimateur classique de $\bar{g}$ est:

$$\hat{g}' = \frac{\sum_{i=1}^{n} g_i}{\sum_{i=1}^{n} s_i}$$

où i est le numéro d'une unité de sondage

$\sum_{i=1}^{n}$ est la somme étendue aux n unités dans l'échantillon

g_i est la surface terrière totale dans l'unité i

s_i est la surface de l'unité i

$\hat{g}'$ est appelé estimation par le quotient; elle est parfois utilisée dans les sondages forestiers pour lesquels il n'est pas toujours possible d'avoir des unités de tailles identiques.

Cette estimation est <u>biaisée</u> et le biais a un <u>ordre de grandeur de</u> $\frac{1}{n}$.

3) Comme il a déjà été dit (paragraphe 112 de ce chapitre), un biais peut provenir d'un mauvais plan de sondage. Ceci peut se produire, par exemple, lorsque l'échantillon est formé d'unités présumées ''représentatives'' choisies par le forestier sur la base de son ''expérience'' et de ses connaissances. Un autre type de biais résultant du sondage peut apparaître lorsque certaines fractions de la population ne sont pas incluses dans le sondage; cela arrive, dans les inventaires forestiers, lorsque, par exemple, les unités qui se trouvent dans des zones d'accès difficile sont remplacées systématiquement par des unités plus faciles.

Ces trois exemples montrent que le biais peut avoir trois origines:

- erreurs de mesure,
- estimation du paramètre d'après l'échantillon,
- méthode de sondage.

Le biais découlant de la méthode de sondage n'est pas toujours décelé et il est pratiquement impossible à évaluer. Une estimation du biais peut être obtenue dans certains procédés d'estimation biaisée.

242 Erreurs de mesure. Les erreurs de mesure peuvent être divisées en trois composantes:

- un biais constant sur toute une population (par exemple quand on a employé un instrument dont la graduation zéro ne correspond pas au zéro vrai)
- une composante variable selon l'unité d'échantillonnage qui peut être liée à la valeur exacte du paramètre mesuré dans l'unité correspondante (par exemple, dans le cas décrit au premier exemple du paragraphe précédent, la composante variable du biais sur la mesure du diamètre est égale à 5% du diamètre);
- pour une unité donnée, une composante ''fluctuante'' de moyenne nulle (dont la variance pourrait être estimée si plusieurs mesures du paramètre étaient faites dans la même unité).

L'erreur de mesure joue à la fois sur l'exactitude de l'estimation de la moyenne (dont l'espérance mathématique diffère de la valeur réelle) et sur celle de l'erreur d'échantillonnage. En supposant que le plan de sondage soit acceptable et que l'on fasse le calcul exact de l'erreur d'échantillonnage , l'estimation de l'erreur est une estimation biaisée de l'erreur vraie.

3. Techniques mathématiques et statistiques de base

31 Principes de l'estimation de l'erreur d'échantillonnage

311 Introduction. Soit μ la valeur réelle de la moyenne d'un paramètre pour toute une population, et $\hat{\mu}$ l'estimation de cette valeur obtenue à partir d'un échantillon d'un type donné, et $\hat{\mu}_j$ l'estimation donnée par l'échantillon j de ce type. Les estimations $\hat{\mu}_j$ correspondant à tous les échantillons du même type seront distribuées d'une certaine manière. La distribution des estimations $\hat{\mu}_j$ aura les caractéristiques suivantes:

a) caractéristique de valeur centrale (moyenne de l'estimation $\hat{\mu}_j$)

$$m = E(\hat{\mu}) = \sum_j \pi_j \hat{\mu}_j$$

où π_j est la probabilité de tirer l'échantillon j ($\sum_j \pi_j = 1$)

E est l'''espérance mathématique'' (voir paragraphe 223)

$\sum_j$ s'étend à tous les échantillons de ce type.

Si tous les échantillons ont la même probabilité d'être tirés ($\pi_j = \pi = \frac{1}{M}$ où M est le nombre total d'échantillons possibles du même type), nous aurons:

$$m = E(\hat{\mu}) = \frac{\sum_j \hat{\mu}_j}{M}$$

Nous avons vu (paragraphe 241) que si $\hat{\mu}$ est sans biais, nous aurons: $m = \mu$

b) caractéristique de dispersion (variance de l'estimation $\hat{\mu}$)

$$\sigma^2(\hat{\mu}) = E[\hat{\mu} - E(\hat{\mu})]^2 = \sum_j \pi_j [\hat{\mu}_j - m]^2$$

(avec les mêmes notations).

Si tous les échantillons ont la même probabilité d'être tirés ($\pi_j = \pi = \frac{1}{M}$) nous aurons:

$$\sigma^2(\hat{\mu}) = \frac{\sum_j (\hat{\mu}_j - m)^2}{M}$$

Il faut remarquer que la distribution étudiée ici est celle des estimations μ_j - de la valeur moyenne sur toute la population d'un paramètre - obtenues à partir de tous les échantillons d'un même type, mais que ce n'est pas la distribution des valeurs de ce paramètre dans cette population.

Exemple: Considérons une parcelle de forêt (population) de N unités de surface unitaire 0,25 hectares. Nous tirons au hasard, sans remise et avec équiprobabilité, un échantillon de n ($n < N$) unités (''unités d'échantillonnage'') dans lesquelles nous comptons le nombre de tiges, y, d'une essence donnée ayant un diamètre de référence supérieur à 10 cm (y est le paramètre).

Le nombre total d'échantillons possibles de ce type est:

$$M = {}^{N}C_n = \frac{N!}{n!\,(N-n)!} \quad \underline{1/}$$

qui est le nombre total de combinaisons distinctes de n unités différentes prises parmi les N unités totales de la population. Tous ces échantillons forment une population de C_N^n éléments. Chacun des échantillons a la même probabilité $\pi_j = \pi = \frac{1}{M}$ d'être tiré (ils ont une chance identique d'être tirés, et cette probabilité peut se calculer à partir des probabilités de tirage des n unités successives).

L'estimateur de la valeur moyenne (par unité) de y, obtenu à partir de l'échantillon j est:

$$\hat{\mu}_j = \bar{y}_j = \frac{\sum_i y_i}{n}$$

où la somme $\sum_i$ s'étend aux n unités i de l'échantillon j.

a) Il existe M estimateurs possibles $\bar{y}_j$ et l'espérance mathématique de $\bar{y}_j$ est:

$$m = E(\bar{y}_j) = \sum_j \pi_j \bar{y}_j = \frac{\sum_j \bar{y}_j}{M}$$

la somme $\sum_j$ s'étendant aux M échantillons j (tous les échantillons de ce type).

S'il n'y a pas de biais provenant d'erreurs de mesure ou de comptage, il est facile de démontrer que pour ce type d'échantillonnage, l'espérance mathématique m, de $\bar{y}_j$, est égale à la valeur vraie $\bar{Y}$ de la moyenne par unité du paramètre y (voir paragraphe 241).

$\bar{y}_j$ est ainsi un estimateur sans biais de $\bar{Y}$, et ce type de sondage appelé sondage aléatoire simple est un type d'échantillonnage non biaisé.

$\hat{Y}_j = N \bar{y}_j$ est de la même façon un estimateur non biaisé du total Y du paramètre pour toute la population.

1/ N! est le produit des N premiers nombres entiers:
N! = 1 x 2 x 3 x 4 x ... x (N-1) x N.

b) La variance de l'estimateur $\bar{y}_j$ (c'est-à-dire la caractéristique de dispersion des valeurs $\bar{y}_j$ pour les M échantillons possibles de ce type) est:

$$V(\bar{y}_j) = E\left[\bar{y}_j - E(\bar{y}_j)\right]^2 = \frac{1}{M}\sum_j (\bar{y}_j - \bar{Y})^2$$

La somme $\sum_j$ étant étendue aux M échantillons possibles.

La théorie des sondages montre que dans le cas d'un sondage aléatoire simple, $V(\bar{y}_j)$ vaut:

$$V(\bar{y}_j) = \frac{\sigma^2}{n}\left(1 - \frac{n}{N}\right)$$

où σ^2 est la variance des valeurs du paramètre sur la population entière formée des N unités.

L'erreur d'échantillonnage au seuil de probabilité 0,95 sur $\bar{y}_j$ est:

$$e_0(\bar{y}_j) = \pm\ 1{,}96\sqrt{V(\bar{y}_j)} = \pm\ 1{,}96\frac{\sigma}{\sqrt{n}}\sqrt{1 - \frac{n}{N}}$$

à condition que n soit assez grand.

$\frac{\sigma}{\sqrt{n}}\sqrt{1 - \frac{n}{N}}$ est l'erreur type et correspond dans le cas où l'hypothèse d'une distribution normale est vérifiée, à l'erreur d'échantillonnage avec P = 0,68 (voir paragraphe 312.1).

On démontre qu'un estimateur sans biais de cette erreur d'échantillonnage fourni par l'échantillon j (au seuil P = 0,95) est:

$$e(\bar{y}_j) = \pm\ 1{,}96\frac{s}{\sqrt{n}}\sqrt{1 - \frac{n}{N}}$$

où $s^2 = \frac{\sum_i (y_i - \bar{y}_j)^2}{n - 1}$ est un estimateur non biaisé de σ^2 basé sur l'échantillon j (la somme $\sum_i$ s'étend aux n unités i de l'échantillon).

De même, un estimateur sans biais de l'erreur type (avec, P = 0,68) est:

$$s(\bar{y}_j) = \pm\frac{s}{\sqrt{n}}\sqrt{1 - \frac{n}{N}}$$

Cet exemple nous montre que la théorie des sondages fournit, pour un plan de sondage donné, les estimations suivantes:

- estimations de la moyenne et du total vrais du paramètre sur toute la population
- estimation de l'erreur d'échantillonnage de ces estimations à un seuil de probabilité donné.

Même si aucun biais n'est introduit par le plan de sondage ni par les opérations de mesure, on peut préférer utiliser des estimations biaisées pour des raisons de commodité ou de simplification des calculs. Dans ces cas là, il faut prendre soin de maintenir le biais à un niveau aussi faible que possible.

Rappelons que nous ne pouvons obtenir les valeurs réelles, mais seulement des estimations, tant de la moyenne (ou du total) du paramètre, que de l'erreur d'échantillonnage. En général, de bonnes estimations (sans biais, ou avec un très faible biais) des moyennes et des totaux ne sont pas difficiles à déterminer. Mais il est plus difficile de calculer des estimations acceptables des erreurs d'échantillonnage correspondantes. Les paragraphes suivants donnent quelques techniques de base utilisées dans l'estimation de l'erreur d'échantillonnage.

312 Estimation de l'erreur d'échantillonnage sur $\hat{\mu}_j$ à partir de sa variance. Hypothèse d'une distribution normale. Comme dans le cas d'un sondage simple aléatoire, la théorie des sondages donne un estimateur non biaisé de la variance de l'estimateur $\hat{\mu}_j$ à condition que certaines conditions soient respectées (tirages aléatoires, sondage de toute la population et pas seulement d'une partie, etc.).

Le problème est maintenant d'estimer l'erreur à un seuil de probabilité donné d'après l'estimateur de cette variance qui elle-même caractérise la dispersion de la distribution de tous les estimateurs possibles $\hat{\mu}_j$ (la caractéristique de la valeur centrale étant m, égale à la valeur réelle, μ, du paramètre sur toute la population, si l'estimation n'est pas biaisée).

312.1 Echantillonnage aléatoire simple.

Dans ce type de sondage nous supposerons que la distribution de tous les $\hat{\mu}_j$ correspondant à tous les échantillons de même taille n (qui n'est pas la distribution du paramètre sur la population entière), est une distribution normale. Cette hypothèse est pratiquement vérifiée lorsque le nombre n d'unités est suffisamment important; il est, en général, admis que la distribution normale de $\hat{\mu}_j$ est obtenue lorsque $n \geq 30$ 1/, quelle que soit la distribution de la population échantillonnée.

L'erreur d'échantillonnage sur $\hat{\mu}_j$ au seuil de probabilité u est proportionnelle à la racine carrée de sa variance:

$$\varepsilon_u(\hat{\mu}_j) = \pm t_u \sqrt{V(\hat{\mu}_j)}$$

($\sqrt{V(\hat{\mu}_j)}$ est l'erreur type).

1/ Ceci est, bien sûr, quelque peu arbitraire. Si, par exemple, les unités de sondage sont des parcelles forestières de même taille et bien définies et si le paramètre est le "nombre de tiges d'une essence donnée de plus de 10 cm de diamètre", l'estimateur $\hat{\mu}_j$ de la moyenne du paramètre par unité peut avoir une distribution sensiblement normale alors qu'il n'est évalué qu'à partir de quinze unités de 0,4 ha tandis que la distribution de $\hat{\mu}_j$ ne peut être considérée comme normale quand l'échantillon est constitué de soixante parcelles de 0,1 ha. Avec cette réserve, le nombre 30 peut être considéré comme donnant un ordre de grandeur de la taille minimale d'un échantillon pour que la distribution de $\hat{\mu}_j$ soit normale.

Les valeurs moyennes de t_u, correspondant aux différents seuils de probabilité, dans le cas d'échantillons où $n \geq 30$, sont données dans le tableau suivant:

Niveau de probabilité u	"Risque" d'erreur α_u	$e_u(\hat{\mu}_j) / \sqrt{V(\hat{\mu}_j)} = t_u$
0,50	1 in 2	0,68
0,68	1 in 3	1,00
0,90	1 in 10	1,64
0,95	1 in 20	2,00
0,99	1 in 100	2,68

Pour d'autres valeurs de t_u correspondant à d'autres seuils de probabilité et à des valeurs spécifiques de n, on doit se reporter à la table de Student et à la table de la distribution normale.

Les deux résultats les plus utiles lorsque $n \geq 30$, sont:

- au seuil de probabilité de 0,68 ("une chance sur trois de se tromper"), l'erreur d'échantillonnage sur $\hat{\mu}_j$ est égale à la racine carrée de sa variance $\sqrt{V(\hat{\mu}_j)}$, c'est-à-dire l'erreur type;

- au niveau 0,95 ("une chance sur vingt de se tromper"), l'erreur sur $\hat{\mu}_j$ est égale environ au double de la racine carrée de sa variance.

Lorsque $n < 30$ (le nombre d'unités dans l'échantillon est inférieur à 30), l'hypothèse d'une distribution normale de $\hat{\mu}_j$ n'est plus acceptable. Il n'y a, en général, aucune méthode pour obtenir l'erreur d'échantillonnage d'après la variance de l'estimateur $\hat{\mu}_j$, du fait de l'inexactitude de l'estimation de la variance dans le cas de petits échantillons. Cependant, si nous pouvons considérer que les valeurs du paramètre ont une distribution plus ou moins normale dans la population, nous aurons toujours la relation suivante entre $e_u(\hat{\mu}_j)$ et $V(\hat{\mu}_j)$:

$$e_u(\hat{\mu}_j) = \pm t_u \sqrt{V(\hat{\mu}_j)}$$

les valeurs de t_u étant obtenues à partir de la table de Student.

Cette table est à deux entrées, l'une correspondant aux seuils de probabilité, l'autre aux nombres de "degrés de liberté". Cette notion n'est pas traitée dans le présent manuel. Il suffit de savoir que dans le cas d'un sondage simple aléatoire et dans de nombreux autres modèles classiques, le nombre de degrés de liberté est égal à n-1, où n est le nombre d'unités d'échantillonnage dans la population entière (où à l'intérieur d'une strate lorsqu'il s'agit d'un sondage stratifié).

Le tableau suivant est extrait de la table de Student pour des seuils de probabilité sélectionnés et pour des tailles données d'échantillons:

Seuil de probabilité u	Nombre de degrés de liberté						
	1	4	9	14	19	24	29
	n = 2	n = 5	n = 10	n = 15	n = 20	n = 25	n = 30
0.50	1.00	0.74	0.70	0.69	0.69	0.69	0.68
0.68	1.80	1.14	1.05	1.03	1.01	1.01	1.00
0.90	6.31	2.13	1.83	1.76	1.73	1.71	1.70
0.95	12.71	2.78	2.26	2.14	2.09	2.06	2.05
0.99	63.66	4.60	3.25	2.98	2.86	2.80	2.76

Ces valeurs de t peuvent être utilisées dans le cas de petits échantillons ($n < 30$), à condition que la distribution des valeurs du paramètre à l'intérieur de la population soit approximativement normale.

312.2 Autres méthodes de sondage

Le sondage simple aléatoire n'est que l'un des nombreux dispositifs de sondage possibles. Dans de nombreux inventaires forestiers, ces autres dispositifs doivent être utilisés et il n'existe pas de façon simple de savoir si la distribution de $\hat{\mu}_j$ peut être, ou on, considérée comme normale. L'''hypothèse de normalité'' sera d'autant mieux vérifiée que le nombre d'unités, n, est plus grand, la valeur minimale requise pour n dépendant de la distribution du paramètre dans la population et, bien sûr, de l'estimateur $\hat{\mu}_j$ qui, lui-même, est fonction du type de sondage. L'''hypothèse de normalité'' est, en général, admise, mais on doit toujours vérifier si elle est raisonnable. La table de la distribution normale sera utilisée suivant la méthode donnée au début du paragraphe 3121. Il peut être préférable, dans certains cas, de stratifier la population en plusieurs sous-populations (''strates'') à l'intérieur de chacune desquelles la distribution des estimateurs $\hat{\mu}_j$ peut être considérée comme plus ''régulière'' et plus proche de la distribution normale.

32 Variance de valeurs composées

321 Introduction. Soit une valeur aléatoire y qui peut être la valeur d'un paramètre dans une unité de la population, ou l'estimation fournie, par un échantillon j d'un certain type, de la valeur moyenne par unité d'un paramètre. Cette variable aléatoire peut être estimée, non pas directement d'après les mesures effectuées sur les unités échantillonnées, mais grâce à d'autres valeurs aléatoires qui sont, elles, directement mesurables à l'intérieur de l'échantillon ou qui ont déjà été estimées à partir de l'échantillon.

Exemples: a) une estimation sans biais de la moyenne par unité d'un paramètre mesurable (par exemple, surface terrière par unité d'échantillonnage de tous les arbres de plus de 10 cm de diamètre sur écorce) dans un échantillon aléatoire simple est:

$$\bar{y} = \frac{\sum_i y_i}{n} = \frac{y_1 + y_2 + \dots + y_n}{n} \qquad (1)$$

où i se rapporte aux n unités de l'échantillon.

L'estimation $\bar{y}$ est fonction des valeurs aléatoires y_i qui sont mesurées directement dans l'échantillon.

b) Une estimation sans biais de la moyenne par unité du même paramètre pour l'ensemble (population) de deux peuplements (sous-populations ou strates) échantillonnés indépendamment, sera:

$$\bar{y} = \frac{S_1}{S}\bar{y}_1 + \frac{S_2}{S}\bar{y}_2 \qquad (2)$$

où S_i et $\bar{y}_i$ correspondent, respectivement, à la surface totale du $i^{ème}$ peuplement et à l'estimation de la moyenne par unité dans ce peuplement ($i = 1$ ou 2), alors que S est la somme des surfaces: $S = S_1 + S_2$.

L'estimation $\bar{y}$ est alors fonction des deux estimations $\bar{y}_1$ et $\bar{y}_2$.

L'estimation sans biais de la variance de y_i est facile à obtenir. Ainsi, afin d'estimer les variances des estimations $\bar{y}$ dans les relation (1) et (2), il faut connaître les relations entre:

- la variance d'une moyenne de valeurs (formule (1)) et la variance d'une valeur individuelle;
- la variance d'une moyenne pondérée (formule (2)) en fonction des variances des différentes moyennes.

Plus généralement, les estimations de la moyenne d'un paramètre, pour des sondages autres que les sondages aléatoires simples, sont fonction d'autres estimations partielles. Les variances des estimations (et de leur erreur d'échantillonnage) peuvent être estimées à partir des variances des estimations partielles en utilisant les relations indiquées dans les paragraphes suivants.

322 Variances de quelques fonctions

322.1 Variance du produit d'une variable aléatoire par une constante

Nous avons: $V(ky) = k^2 V(y)$ où y est la variable aléatoire et k la constante.

Si $\bar{y}$, par exemple, est une estimation de la valeur moyenne d'un paramètre par unité dans un échantillonnage aléatoire simple et N le nombre total d'unités de la population (N est supposé parfaitement connu), l'estimation correspondante du total du paramètre pour toute la population est:

$$\hat{Y} = N\bar{y}$$

et la variance de ce volume total sera: $V(\hat{Y}) = N^2 V(\bar{y})$

322.2 Variance d'une somme de variables aléatoires indépendantes

a) Indépendance de deux variables aléatoires

Deux variables aléatoires sont indépendantes si leur covariance est nulle (voir paragraphe 223 pour la définition de la covariance).

b) Exemples de variables aléatoires dépendantes

i) Etant donnée une ligne (population) de 1 000 arbres (unités) le long d'une route, nous voulons obtenir une estimation du diamètre moyen de référence (D) par arbre à l'aide d'un échantillon systématique de 50 arbres, en prenant un arbre sur 20. Le numéro de position

du premier arbre échantillon sera tiré au hasard parmi les nombres de 1 à 20, comme par exemple le 13, et les arbres échantillons suivants seront les 33ème, 53ème ... jusqu'au 993ème. L'estimation de la moyenne D sera alors:

$$(\bar{D}) = \frac{D_{13} + D_{33} + \ldots + D_{993}}{50}$$

En général, si $k = \frac{N}{n}$ (N étant le nombre total d'unités dans la population et n le nombre d'unités dans l'échantillon), l'estimation de la moyenne d'un paramètre y obtenu à partir d'un échantillonnage systématique peut être mis sous la forme:

$$\bar{y} = \frac{y_i + y_{i+k} + \ldots + y_{i+(n-1)k}}{n} \quad \text{où} \quad 0 < i \leq k$$

Il existe k paires de valeurs (y_i, y_{i+k}) pour i = 1 à k. Les variables y_i et y_{i+k} ne seront pas indépendantes statistiquement si leur covariance n'est pas nulle, ce qui équivaut à dire:

$$\text{cov}\,(y_i, y_{i+k}) = \frac{\sum_{i=1}^{k} (y_i - \bar{y}_1)(y_{i+k} - \bar{y}_2)}{k} \neq 0$$

où $$\bar{y}_1 = \frac{\sum_{i=1}^{k} y_i}{k}$$

et $$\bar{y}_2 = \frac{\sum_{i=1}^{k} y_{i+k}}{k}$$

De même, les variables $\bar{y}_i$ et y_{i+2k} peuvent aussi ne pas être statistiquement indépendantes si $\text{cov}(y_i, y_{i+2k}) \neq 0$, ce qui équivaut à dire que l'intervalle double (2k) entre deux arbres n'est pas toujours suffisant. Plus généralement le même raisonnement peut être appliqué à toute paire de variables aléatoires y du numérateur de $\bar{y}$.

Dans l'exemple des arbres d'alignement, cette indépendance peut ne pas être réalisée si, par exemple, la distance entre deux arbres successifs de l'échantillon est trop petite (interaction possible entre les arbres), ou si cet intervalle coïncide plus ou moins avec la ''longueur d'onde'' de certaines caractéristiques du sol.

c) Les estimations obtenues à partir d'échantillons ne sont pas indépendantes si les échantillons sont, eux-mêmes, dépendants.

Considérons encore les deux peuplements de l'exemple du paragraphe 321 et supposons que le sondage ne se fait pas indépendamment dans ces deux strates. Ceci implique que le nombre et/ou la composition de tous les échantillons prévus dans la deuxième strate dépendent de l'échantillon tiré dans la première strate (ou inversement) 1/. Il est alors facile de

1/ Ceci pourrait se produire si, afin d'éviter que l'inventaire forestier ne soit trop coûteux on ne choisissait dans le deuxième peuplement que des parcelles ayant une faible proportion d'unités d'accès difficile lorsque l'échantillon du premier peuplement comprend déjà un nombre relativement important de ces unités. Il est évident que, dans ce cas, le nombre et la composition de tous les échantillons possibles du deuxième peuplement dépendront de l'échantillon choisi dans le premier.

démontrer que $\bar{y}_1$ et $\bar{y}_2$ (estimations respectives de la moyenne d'un paramètre dans le premier et le deuxième peuplement) sont des estimations statistiquement dépendantes, et que leur covariance n'est, ainsi, pas nulle:

$$\text{cov}(y_1, y_2) = \frac{\sum_{j,k} (\bar{y}_{1j} - \bar{Y}_1)(\bar{y}_{2k} - \bar{Y}_2)}{M_1 \times M_2} \neq 0$$

où $\bar{Y}_1$ et $\bar{Y}_2$ sont les valeurs vraies des moyennes par unité respectivement dans le premier et dans le deuxième peuplement, $\bar{y}_{1j}$ et $\bar{y}_{2k}$ les estimations respectives de $\bar{Y}_1$ d'après l'échantillon j dans le premier peuplement et de $\bar{Y}_2$ d'après l'échantillon k dans le deuxième peuplement.

M_1 et M_2 sont les nombres d'échantillons possibles d'un type donné, dans les peuplements 1 et 2, la somme $\sum_{j,k}$ s'étendant aux $M_1 M_2$ doubles produits $(\bar{y}_{1i} - \bar{Y}_1)(\bar{y}_{2k} - \bar{Y}_2)$.

d) On peut démontrer que la variance d'une somme de variables aléatoires indépendantes est la somme des variances de ces variables

Si $y = \sum_i y_i$ avec les y_i indépendants, on a:

$$V(y) = \sum_i V(y_i)$$

322.3 Variance de l'estimation d'une moyenne à partir d'un échantillon aléatoire simple dans le cas d'une population infinie. On a:

$$\bar{y} = \frac{y_1 + y_2 + \ldots + y_n}{n} \quad \text{où les } y_i \text{ sont indépendants.}$$

En appliquant les deux théorèmes précédents, on aura:

$$V(\bar{y}) = \frac{1}{n^2} [V(y_1) + V(y_2) + \ldots + V(y_n)]$$

Les n variances entre parenthèses sont toutes égales à la variance $\sigma^2(y)$ des valeurs du paramètre sur toute la population; nous aurons donc le résultat capital suivant:

$$\boxed{\sigma^2(\bar{y}) = V(\bar{y}) = \frac{\sigma^2(y)}{n}}$$

La variance de l'estimation de la moyenne dans un sondage aléatoire simple, est égale à la variance de la valeur du paramètre dans toute la population divisée par le nombre d'unités de sondage.

Par conséquent, l'erreur d'échantillonnage sur l'estimation de la moyenne (qui est proportionnelle à la racine carrée de la variance lorsque n/N est petit), sera inversement proportionnelle à la racine carrée du nombre d'unités.

Cas de populations finies

Les résultats précédents sont valables aussi bien pour des populations infinies que pour des populations finies lorsque le taux d'échantillonnage (ou intensité d'échantillonnage), $f = \frac{n}{N}$ est relativement petit (disons 5%).

Dans le cas de populations finies, la théorie des sondages montre que nous avons en fait:

$$\sigma^2(\bar{y}) = \frac{\sigma^2(y)}{n}\left(1-\frac{n}{N}\right) = \frac{\sigma^2(y)}{n}(1-f)$$

et $$\sigma(y) = \frac{\sigma(y)}{\sqrt{n}}\sqrt{1-f}$$

Les facteurs 1-f et $\sqrt{1-f}$ sont appelés ''facteurs de correction pour population finie'' et peuvent être négligés si f est petit.

L'utilisation de ces facteurs peut se justifier a posteriori; si l'échantillonnage devient un recensement complet, l'erreur type et/ou l'erreur d'échantillonnage doivent être nulles. Ce résultat peut être obtenu à partir de la formule précédente car, dans ce cas, f = 1.

322.4 Variance d'une fonction linéaire de variables aléatoires

Si nous avons: $y = a_1y_1 + a_2y_2 + \ldots + a_py_p = \sum_{i=1}^{p} a_iy_i$.

(a_1, a_2, ..., a_p étant des constantes positives ou négatives)

en appliquant les théorèmes des paragraphes 322.1 et 322.2 on a:

$$V(y) = a_1^2\,V(y_1) + a_2^2\,V(y_2) + \ldots + a_p^2\,V(y_p) = \sum_{i=1}^{p} a_i^2\,V(y_i)$$

Dans le cas du deuxième exemple du paragraphe 321, on aura:

$$V(\bar{y}) = \frac{s_1^2}{s^2}V(\bar{y}_1) + \frac{s_2^2}{s^2}V(\bar{y}_2)$$

Ce théorème est parfois appelé: ''théorème de la propagation des erreurs''. Il est utilisé dans l'échantillonnage aléatoire stratifié.

322.5 Variances du produit et du quotient de deux variables aléatoires indépendantes

Soit x et y deux variables aléatoires indépendantes, dont les variances sont faibles par rapport aux carrés de leurs valeurs respectives. Nous aurons les formules approchées suivantes:

$$V(xy) = y^2\,V(x) + x^2\,V(y)$$

$$V\left(\frac{y}{x}\right) = \left(\frac{y}{x}\right)^2\left[\frac{V(x)}{x^2} + \frac{V(y)}{y^2}\right]$$

322.6 Variance de fonctions de variables aléatoires dépendantes

Si $y_1, y_2, \ldots, y_p$ sont des variables aléatoires dépendantes et $a_1, a_2, \ldots, a_p$ des constantes positives ou négatives, la variance de y, où:

$$y = a_1y_1 + a_2y_2 + \ldots + a_py_p = \sum_{i=1}^{p} a_iy_i$$

sera:

$$V(y) = \sum_{i=1}^{p} a_i^2 V(y_i) + 2 \sum_{i \neq j} a_ia_j V(y_i, y_j)$$

où la somme $\sum_{i \neq j}$ s'étend à toutes les combinaisons possibles de i et de j, j étant différent de i, et $V(y_i, y_j)$ étant la covariance de y_i et y_j.

Si $a_1 = a_2 = \ldots = a_p = \frac{1}{p}$ et si les y_i sont les valeurs d'un même paramètre dans les p unités consécutives de même taille d'un échantillon systématique, y est alors l'estimateur de la moyenne par unité de cet échantillon et peut s'écrire $\bar{y}$. Sa variance:

$$V(\bar{y}) \neq \frac{V(y)}{p} = \sum_{i=1}^{p} a_i^2 V(y_i), \text{ car les covariances } V(y_i, y_j)$$

qui forment le terme supplémentaire de la relation seront, dans la plupart des cas, différentes de 0.

Plus généralement, on peut dire que pour de nombreux paramètres les formules applicables aux sondages aléatoires pour estimer la variance de l'estimation de la moyenne ne sont pas applicables dans de nombreux dispositifs de sondage systématique. Dans un inventaire forestier systématique, l'équidistance entre unités voisines devra être assez longue pour éviter toute covariance (ou corrélation) positive (ou négative) entre les valeurs respectives d'un paramètre donné si l'on veut utiliser la relation:

$$V(\bar{y}) = \frac{V(y)}{p}$$

Produit et rapport de deux variables aléatoires indépendantes

A condition que les variances soient faibles par rapport aux carrés des variables aléatoires respectives, les formules du paragraphe 322.5 deviennent:

$$V(xy) = y^2 V(x) + x^2 V(y) + 2xy V(x, y)$$

$$V\left(\frac{y}{x}\right) = \left(\frac{y}{x}\right)^2 \left[\frac{V(x)}{x^2} + \frac{V(y)}{y^2} - 2\frac{V(x, y)}{xy}\right]$$

$V(x, y)$ étant la covariance de x et y.

33 Estimations par le quotient

La précision de l'estimation de la moyenne d'un paramètre y est améliorée s'il est possible de la corréler avec un autre paramètre x, celui-ci étant parfaitement connu pour la population entière ou pour un échantillon plus important. D'un autre côté, on peut désirer connaître, non seulement le paramètre y lui-même, mais une combinaison de y avec un ou

plusieurs autres paramètres. Au cours d'un inventaire forestier, si les unités de sondage sont de tailles inégales, il faut connaître deux variables aléatoires dans chaque unité de sondage i:

- la valeur y_i prise dans l'unité par le paramètre y,
- la surface x_i de cette unité.

L'estimation recherchée sera essentiellement celui de la valeur moyenne du paramètre y par unité de surface (et non par unité de sondage), ce qui correspond, en fait, au rapport $\frac{\bar{y}}{\bar{x}}$ des deux paramètres.

Du fait que dans les inventaires forestiers, les unités de sondage n'ont souvent pas la même taille, l'utilisation d'une variable auxiliaire x en rapport avec la taille de l'unité de sondage paraît indispensable dans de nombreux cas. Le modèle de la relation entre y et x est le plus souvent le modèle linéaire:

$$y = a + bx \quad (\text{''estimation par régression linéaire''})$$

et souvent $y = bx$ (''estimation par le quotient'')

La première équation est acceptable à condition que la relation entre les deux paramètres soit forte et puisse être représentée valablement par une ligne droite. Ceci équivaut à dire que le coefficient de corrélation doit être le plus voisin possible de 1. Pour que la deuxième équation soit valable il faut, en plus, que la droite passe par l'origine ou que x et y tendent simultanément vers 0. Cela s'observe notamment dans le cas des variables: surface de l'unité de sondage d'une part, et paramètre forestier d'autre part; lorsque la surface tend vers 0, les paramètres forestiers usuels tendent aussi vers 0.

C'est pour cette raison que les estimations par le quotient sont utilisées dans les inventaires forestiers

On utilise couramment deux types d'estimations par le quotient dans un sondage aléatoire simple. Ce sont:

$$\hat{R} = \frac{\bar{y}}{\bar{x}} = \frac{\sum_{i=1}^{n} y_i}{\sum_{i=1}^{n} x_i} \quad \text{''quotient des moyennes''}$$

et

$$\hat{r} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \frac{y_i}{x_i} \quad \text{''moyenne des quotients''}$$

Le paragraphe 322.6 nous montre comment obtenir une estimation valable de la variance de $\hat{R}$, à condition que les variances soient faibles par rapport aux carrés des estimations respectives $\bar{x}$ et $\bar{y}$.

34 Optimisation 1/ des plans de sondage

341 Optimisation d'un plan de sondage. Le plan de sondage le plus efficace est celui qui donne, pour un coût déterminé, la plus faible erreur d'estimation d'un paramètre, ou qui, pour une erreur déterminée de ce paramètre, est le moins coûteux.

1/ Par optimisation on entend ici le choix et l'élaboration du plan de sondage optimum (le plus efficace).

341.1 Problèmes d'optimisation

Si la définition de l'efficacité est facile, le choix du plan de sondage le plus efficace est beaucoup plus difficile du fait d'un certain nombre de problèmes, parmi lesquels on peut indiquer les suivants.

a) Pour des raisons pratiques, tous les plans de sondage possibles ne sont pas pris en considération lorsqu'on en choisit un. Certaines caractéristiques du plan envisagé sont fixées à l'avance. Dans le cas de sondages effectués sur le terrain, la surface des unités à chaque degré, le nombre de degrés, et la stratification sont définis avant l'optimisation. Ce choix est généralement fondé sur des expériences antérieures. On doit souligner que l'optimisation, en conséquence, est partielle et non absolue. Il existe, ainsi, un plan de sondage ''optimum'' pour chaque ensemble de caractéristiques du sondage prédéterminées. Dans de nombreux livres et manuels, le calcul d'optimisation se borne à l'estimation du nombre optimum d'unités de sondage à chaque degré. Ce calcul est basé sur une formulation simple des coûts.

b) Une estimation complète de l'erreur devrait tenir compte non seulement de l'erreur d'échantillonnage mais aussi des biais et des erreurs de mesure (voir paragraphe 24). Ces derniers éléments étant souvent difficiles, sinon impossibles, à évaluer, les calculs d'efficacité ne portent le plus souvent que sur les erreurs d'échantillonnage et ne sont valables que si les erreurs de mesure sont réduites au maximum. Il est souvent plus important d'éliminer ou de réduire les erreurs de mesure que d'optimiser parfaitement le plan de sondage.

c) Un troisième problème qui apparaît lors de l'élaboration du plan de sondage optimal est lié aux paramètres. Un dispositif optimal pour l'estimation d'un paramètre donné (volume brut d'une essence commerciale dépassant 60 cm de diamètre par exemple), ne l'est pas pour n'importe quel autre (volume brut d'un groupe d'essences commerciales dépassant 60 cm de diamètre par exemple). Lorsqu'on planifie l'inventaire, il est donc capital de choisir le paramètre le plus important et de rechercher le dispositif le plus efficace pour l'estimation de ce paramètre. Il est souvent difficile de déterminer le paramètre le plus important parmi ceux qu'il faut estimer. Même si une seule espèce est intéressante, comme c'est le cas pour l'Okoumé au Gabon ou pour le Pin dans les forêts tropicales résineuses, il peut exister de nombreux autres paramètres utiles. En plus du volume des arbres exploitables d'une essence déterminée, il est important de connaître avec précision, en vue de l'aménagement, le nombre de tiges des petites classes de diamètre. Dans tous les cas, on évitera les plans de sondage fondés sur des paramètres qui ne sont pas en rapport avec le but recherché. Par exemple, ''le volume brut de toutes les essences de plus de 10 cm de diamètre'' ne devrait pas être utilisé comme paramètre de base dans la préparation d'un inventaire d'une forêt tropicale où peu d'essences sont utilisables, bien que cela se soit souvent produit.

d) Dans un plan de sondage, l'erreur d'échantillonnage d'un paramètre dépend, entre autres facteurs, de la variabilité de ce paramètre entre les unités de la population. Pour optimiser le plan de sondage, on doit faire une estimation préalable de cette variabilité. On peut l'obtenir d'après des inventaires antérieurs; cependant, dans de nombreux cas, il n'y a aucune source d'information et un sondage préalable réduit est nécessaire pour estimer les variances et les coefficients de variation qui sont nécessaires au calcul de l'erreur. Cet inventaire préalable est nécessaire aussi pour estimer les coûts unitaires, qui sont nécessaires pour les calculs d'optimisation du dispositif.

341.2 Formulation mathématique d'une optimisation

Exprimons la précision d'un sondage donné par l'erreur type SE de l'estimation du paramètre choisi comme le plus important; soit d'autre part, C, le prix de revient du sondage. SE et C sont fonction de plusieurs caractéristiques du plan de sondage, telles que la taille de l'unité de sondage et le nombre d'unités ou le taux de sondage dans le cas d'un sondage aléatoire simple. Si $x_1, x_2, \ldots, x_p$ représentent ces différentes caractéristiques,

on a: $SE = SE\ (x_1, x_2, \ldots, x_p)$

$C = C\ (x_1, x_2, \ldots, x_p)$

a) Supposons que le prix de revient total de l'inventaire soit déjà fixé et égal à C_o; nous devrons, dans ce cas, minimiser l'erreur type SE. Nous aurons donc:

$$SE\ (x_1, x_2, \ldots, x_p) = \text{minimum}$$

avec $$C\ (x_1, x_2, \ldots, x_p) = C_o$$

On montre que les valeurs correspondantes $(x_1)_o$, $(x_2)_o$ ... $(x_p)_o$ des caractéristiques x_1, x_2, ..., x_p sont déterminées en résolvant le système suivant de p +1 équations à p + 1 inconnues x_1, x_2, ..., x_p, λ:

$$\begin{cases} \frac{\partial SE}{\partial x_1} + \lambda \frac{\partial C}{\partial x_1} = 0 \\ \frac{\partial SE}{\partial x_2} + \lambda \frac{\partial C}{\partial x_2} = 0 \\ \text{- - - - - - - - - - - - - - -} \\ \frac{\partial SE}{\partial x_p} + \lambda \frac{\partial C}{\partial x_p} = 0 \\ C(x_1, x_2, \ldots x_p) - C_o = 0 \end{cases}$$

$\frac{\partial SE}{\partial x_i}$ et $\frac{\partial C}{\partial x_i}$ sont les dérivées partielles de SE et C par rapport à x_i.

b) Supposons que l'on désire une précision donnée de l'estimation du paramètre à un seuil de probabilité déterminé. Dans ce cas, l'erreur type sera constante et égale à une valeur donnée $(SE)_o$. Nous aurons alors à minimiser le coût C et ceci se traduira par:

$$C\ (x_1, x_2, \ldots, x_p) = \text{minimum}$$

avec $$SE\ (x_1, x_2, \ldots, x_p) = (SE)_o \qquad (1)$$

Les valeurs correspondantes $(x'_1)_o$, $(x'_2)_o$, ..., $(x'_p)_o$ seront déterminées en résolvant le même système d'équations, la dernière étant remplacée par l'équation (1). On peut signaler que les p premières équations sont les mêmes et que les solution $(x_1)_o$, $(x_2)_o$ ... $(x_p)_o$ sont reliées par les mêmes (p-1) équations.

c) Application numérique

Considérons tous les sondages aléatoires simples que l'on peut effectuer sur le terrain (en utilisant des éléments de surface comme unités de sondage) pour estimer un paramètre donné d'une forêt à inventorier. Supposons que nous ayons trouvé, empiriquement, par un inventaire préalable et/ou par des inventaires précédents, que l'erreur type SE de l'estimation de ce paramètre peut être représentée approximativement par l'expression suivante:

$$SE = \frac{a \log s + b}{\sqrt{ns}}$$

s étant la surface de l'unité d'échantillonnage

log s étant le logarithme népérien de s

n étant le nombre d'unités de l'échantillon

a et b étant des coefficients.

Supposons que le coût total de ce sondage soit exprimé d'une manière acceptable par la formule suivante:

$$C = \alpha + \beta n + \gamma ns$$

α étant le coût fixe indépendant de l'importance du sondage

β étant le coût d'accès à une unité d'échantillonnage

γ étant le coût des opérations de comptage par unité de surface.

Si le coût total de l'inventaire est connu et égal à C_o, la surface optimale de l'unité de sondage s_o et le nombre optimal d'unités n_o seront les solutions du système d'équations suivant:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial SE}{\partial s} + \lambda \dfrac{\partial C}{\partial s} = 0 \\ \dfrac{\partial SE}{\partial n} + \lambda \dfrac{\partial C}{\partial n} = 0 \\ \alpha + \beta n + \gamma ns = Co \end{cases}$$

En éliminant λ des deux premières équations, on a:

$$\frac{\partial SE}{\partial s} \cdot \frac{\partial C}{\partial n} - \frac{\partial SE}{\partial n} \cdot \frac{\partial C}{\partial s} = 0 \qquad (2)$$

En remplaçant ces dérivées par leurs expressions dans l'équation (2) et en simplifiant on trouve que la solution s_o, (valeur optimale de la taille de l'unité de sondage), vérifie l'équation:

$$\log s_o - \left(2 \frac{\gamma}{\beta} s_o + 2 - \frac{b}{a}\right) = 0$$

s_o peut se déterminer graphiquement: c'est l'ordonnée s du point d'intersection de la courbe représentant la fonction $y = \log s$ avec la droite représentant la fonction:

$$y = 2 \frac{\gamma}{\beta} s + 2 - \frac{b}{a}$$

La valeur optimale correspondante, n_o, est déterminée facilement à partir de la relation:

$$\alpha + \beta no + \gamma n_o s_o = Co \qquad \text{ou} \qquad n_o = \frac{Co - \alpha}{\beta + \gamma so}$$

342 Optimisation d'un inventaire. La définition du dispositif d'inventaire optimum est identique à la définition du plan de sondage optimum donnée au paragraphe 341. Les problèmes d'optimisation d'un inventaire sont semblables à ceux d'un plan de sondage mais ils sont plus difficiles à résoudre car un inventaire comporte souvent une série de plans de sondage (par exemple, un pour l'estimation des surfaces, un autre pour l'estimation sur le terrain du nombre moyen de tiges par classe de diamètre et un troisième pour l'évaluation des volumes au moyen des tarifs de cubage). Le dispositif d'inventaire le plus efficace peut ne pas être une combinaison de plusieurs plans de sondages optimums. Ainsi, il se peut qu'il soit préférable de calculer les volumes en mesurant des arbres sur pied dans les unités de sondage, plutôt que de construire des tarifs de cubage à partir d'une sélection d'arbres échantillons. Cela éliminerait le besoin d'un troisième plan de sondage. Il peut être plus efficace d'estimer les surfaces par sondage sur le terrain, plutôt que d'après la photointerprétation. Dans la plupart des cas il est trop difficile de faire un calcul exhaustif d'efficacité avant de choisir le dispositif d'inventaire. On se contente souvent

d'une valeur approchée du prix de revient général et de la précision demandée en tenant également compte d'éléments tels que l'existence de documents (photographies aériennes, cartes, tarifs de cubage...), le niveau de formation des ouvriers, les facilités de transport, etc. Une fois que la structure générale de l'inventaire a été décidée, on fait des calculs d'efficacité pour chacun des plans de sondage. Bien que cette méthode ne soit pas théoriquement la meilleure, il faut s'en contenter dans la plupart des cas.

4. Plans de sondage classiques

41 Classification des plans de sondage

411 Caractéristiques des plans de sondage. Un plan de sondage est défini par une combinaison d'un certain nombre de caractéristiques qui sont discutées ci-dessous.

411.1 Nature des unités de la population

Une même surface forestière peut être considérée comme une population soit d'arbres, de parcelles (de surfaces identiques ou pas), de points ou de lignes. Il est très important de spécifier au départ ce qui sera considéré comme unité dans la population, car les unités de sondage du dernier degré seront choisies parmi ces unités; en particulier, si la zone forestière est considérée comme une population d'unités de tailles égales, la taille de l'unité devra être spécifiée. Lorsque l'on veut caractériser la variabilité d'un paramètre donné, on devrait toujours donner le coefficient de variation (voir le paragraphe 223 de ce chapitre) en spécifiant la surface de l'unité à laquelle ce coefficient correspond. On ne peut comparer la variabilité de deux paramètres si leurs coefficients de variation sont relatifs à des unités de surfaces différentes.

411.2 Utilisation d'un paramètre auxiliaire

Dans certains cas, comme quand on a affaire à des unités de tailles différentes, on combine les paramètres avec une variable auxiliaire pour améliorer la précision des estimations. L'estimation de cette variable auxiliaire peut ne pas être un objectif de l'inventaire mais son utilisation comme paramètre auxiliaire est nécessaire et, en général, avantageuse. Deux cas principaux peuvent être considérés:

- on fait un sondage supplémentaire pour estimer la variable auxiliaire. C'est le cas du mode d'échantillonnage appelé double échantillonnage (ou sondage à deux degrés);

- il n'y a pas de sondage particulier (ou supplémentaire). Dans le cadre du plan de sondage normal, la variable auxiliaire est notée en même temps que les paramètres à estimer. C'est le cas de plans de sondage conçus pour obtenir des estimations par le quotient (ou par régression) et dans lesquels on connaît pour l'ensemble de la population la valeur totale du paramètre auxiliaire.

411.3 Nombre de degrés

Si les unités de la population sont sondées directement, c'est un sondage à un degré.

Il peut arriver que, pour des raisons de commodité, la population soit considérée au premier degré comme une population de groupes d'unités; on tire alors un échantillon de ces groupes (appelés unités primaires). Au deuxième degré, on tire un échantillon d'unités (secondaires), dans chacun des groupes choisis au premier degré. C'est la méthode de sondage à deux degrés. Ce dispositif ne doit pas être confondu avec le sondage en grappes (voir paragraphe 412).

D'autres degrés intermédiaires peuvent être ajoutés, et, en général, ces échantillonnages sont appelés: dispositifs d'échantillonnage à plusieurs degrés. La taille d'une unité intermédiaire est exprimée par le nombre d'unités du degré suivant qu'elle contient.

En foresterie, il y a de nombreux exemples de dispositifs à deux degrés, quelques-uns à trois, et sans doute très peu avec plus de trois degrés.

411.4 Autres caractéristiques

Les caractéristiques suivantes intéressent tout degré d'un plan de sondage.

- Stratification

Afin de réduire la variabilité d'un paramètre dans toute la population et de réduire aussi l'erreur d'échantillonnage de l'estimation, il vaut mieux, en général, diviser la population en sous-populations plus homogènes (par rapport à ce paramètre) appelées strates, et sonder les strates indépendamment les unes des autres. Dans ce cas, le sondage est dit (pour ce degré) stratifié. La stratification est parfois effectuée en tenant compte d'une subdivision utile, déjà existante, de la population; c'est le cas où la population est une zone forestière déjà subdivisée en unités géographiques naturelles (bassins versants ...).

La stratification peut se faire avant le tirage de l'échantillon (c'est la véritable stratification ou ''stratification a priori''), ou après ce tirage (c'est la ''stratification a posteriori'').

Dans un sondage à deux degrés, la stratification peut se faire au premier degré en répartissant les groupes d'unités appelés ''unités primaires'' dans différentes strates, ou au deuxième degré, ou à chaque degré.

- Sondage systématique ou aléatoire

La théorie des sondages ne s'applique, en principe, qu'aux sondages effectués au hasard. Il existe de nombreuses procédures de tirage au hasard. Par exemple, dans une plantation à espacement régulier, on peut établir le dispositif d'échantillonnage aléatoire simple en tirant des nombres dans une table de nombres au hasard, après avoir numéroté tous les arbres de la plantation 1/.

Parfois, pour des raisons pratiques ou pour des raisons liées à l'estimation des paramètres (ex: cartographie de formations forestières dans certains inventaires forestiers), il est plus pratique d'utiliser un échantillonnage systématique à un degré ou à tous les degrés du sondage. Si nous devons inventorier une rangée d'arbres (unités), on aura un échantillon systématique en choisissant un arbre tous les p arbres (intensité de sondage: $f = 1/p$); si nous devons inventorier une zone forestière, nous pouvons choisir l'échantillon au moyen d'une grille placée sur la carte, chaque point de la grille étant le centre d'une unité de sondage.

La théorie des sondages ne fournit pas d'estimation parfaitement satisfaisante de l'erreur d'échantillonnage dans les sondages systématiques mais il est possible d'en obtenir de bonnes approximations par certaines méthodes dont quelques-unes sont décrites au paragraphe 423 ci-dessous.

- Tirage avec ou sans remise

Comme nous l'avons vu au paragraphe 233, la plupart des sondages sont considérés comme étant ''avec remise'' bien qu'ils soient, en fait, ''sans remise'' car la même unité ne peut être prise deux fois (les unités de sondage dans un échantillon donné sont toutes différentes). Tous les plans de sondage donnés au paragraphe 42 sont considérés comme s'ils étaient avec remise. Cette approximation est d'autant plus acceptable que le taux de sondage (nombre d'unités de sondage par rapport au nombre total d'unités) est faible.

1/ S'il y a moins de 1 000 lignes et moins de 1 000 colonnes dans la plantation, chaque arbre peut être numéroté par un nombre à 6 chiffres, 3 pour sa colonne et 3 pour sa ligne.

- Tirage avec probabilités égales ou inégales

A un degré donné du sondage, les unités peuvent être tirées avec des probabilités égales ou inégales (voir paragraphe 233). Dans certains cas les unités sont choisies avec une probabilité proportionnelle à leur taille (PPS). Cela se révèle parfois très efficace. C'est le cas des inventaires forestiers à deux degrés dans lesquels les unités du premier degré (unités primaires) sont choisies avec des probabilités proportionnelles à leur surface forestière 1/.

- Unités de tailles égales ou inégales

Supposons qu'une zone forestière à inventorier soit rectangulaire et divisée arbitrairement en blocs carrés de 1 km de côté. Supposons que la popualtion soit la zone entière, y compris les surfaces non boisées: dans ce cas les unités peuvent être les blocs entiers et seront alors de même taille. Cependant, si nous considérons que la population se limite aux zones forestières, les unités seront la portion boisée de chaque bloc et n'auront donc pas la même taille.

Dans les deux cas, ces blocs peuvent être tirés avec ou sans probabilité égale (par exemple, dans le cas de blocs de tailles inégales, la probabilité peut être proportionnelle à la taille). Les blocs peuvent être les unités finales (auquel cas, le sondage sera à un degré), ou ils peuvent être les unités primaires d'un sondage à deux degrés dont les unités secondaires seraient, par exemple, des parcelles de tailles égales.

- Nombre égal ou inégal d'unités de sondage par unité du degré précédent (cas des sondages à plusieurs degrés)

On peut choisir un nombre différent d'unités secondaires par unité primaire dans un sondage à deux degrés. Lorsque les unités primaires sont de même taille, le taux de sondage au deuxième degré (c'est-à-dire le rapport du nombre d'unités secondaires choisies dans chaque unité primaire au nombre total d'unités secondaires par unité primaire) peut varier d'une unité primaire à l'autre. Lorsque les unités primaires n'ont pas la même dimension, le nombre d'unités secondaires tirées peut être proportionnel à la taille des unités primaires (dans ce cas, le taux de sondage au deuxième degré reste constant).

412 Grappes et unités de relevé. En général, le terme ''grappe'' est utilisé pour définir une unité de sondage qui est, en fait, un groupe d'unités plus petites. La grappe est l'unité statistique alors que les unités plus petites sont des unités de relevé. L'information est collectée au niveau de chaque unité de relevé et est ensuite regroupée avec celle provenant des autres unités afin de reconstituer l'information au niveau de l'unité de sondage (grappe). Les unités de relevé ne sont pas les unités statistiques. Le sondage en grappes ne devrait être, en aucun cas, considéré comme synonyme de sondage à deux degrés. Plus généralement, les notions de sondage à plusieurs degrés et de sondage par grappes sont différentes, elles peuvent cependant coexister car il est facile de concevoir un plan de sondage à plusieurs degrés où, à chaque degré, les unités de sondage sont des grappes.

42 Plans de sondage classiques utilisés en foresterie

421 Introduction. Nous allons citer ci-dessous quelques plans classiques de sondage utilisés par les forestiers. Ce ne sont pas des dispositifs d'inventaire. Ceux-ci seront traités au chapitre VII. Comme nous l'avons déjà vu, un plan d'inventaire forestier est en général une combinaison de plans de sondage.

1/ L'utilisation de l'expression ''sondage PPS'' pour les sondages par points dans lesquels les arbres sont choisis en chaque point de sondage à l'aide du prisme ou du relascope de Bitterlich (c'est-à-dire proportionnellement à leur surface terrière), n'est pas correcte, car les unités de sondage sont les points eux-mêmes (ou éventuellement des grappes de points) et non pas les arbres.

Tous les plans de sondage donnés ci-dessous, comme d'ailleurs tout autre plan de sondage, peuvent ou non utiliser le sondage par grappes. Dans le paragraphe précédent, nous avons vu que l'on a une grappe quand l'unité de sondage est subdivisée en unités plus petites. Ce peut être le cas à n'importe quel degré et cela n'influence pas les formules correspondantes.

Pour chaque plan de sondage, on donnera les deux formules suivantes:

- l'expression de la meilleure estimation de la moyenne d'un paramètre sur toute la population, et par unité de sondage du dernier degré, (''unité finale'') dans le cas d'unités de même dimension ou par unité de taille dans le cas d'unités de tailles différentes.

- l'expression de la meilleure estimation de la variance de cette estimation de la moyenne; comme nous l'avons vu au paragraphe 312, l'erreur d'échantillonnage correspondante à un seuil de probabilité donné, est proportionnelle à la racine carrée de la variance, sous condition que l'hypothèse de normalité soit acceptable.

Estimation d'une proportion: la proportion d'unités de la population ayant un caractère donné (par exemple, proportion d'unités appartenant à un type de forêt particulier), peut être considérée comme la valeur moyenne par unité du paramètre, lequel prend la valeur 1, si l'unité a le caractère ou la valeur 0 si elle ne l'a pas. Les formules générales s'appliquent à ce paramètre mais on peut les exprimer plus simplement. Les formules simplifiées correspondantes seront données pour les dispositifs les plus courants. Pour les autres, elles pourront être établies facilement en tenant compte du fait que le paramètre correspondant ne peut prendre que les valeurs 0 ou 1.

422 Plans de sondages aléatoires (non systématiques). Le tableau ci-dessous groupe les plans de sondage aléatoires décrits plus loin. Les chiffres se reportent aux sous-paragraphes correspondants.

<table>
<tr><th>Type de sondage</th><th>Nombre de degrés</th><th>Taille des unités du premier degré</th><th>Taille des unités du deuxième degré</th><th>Stratification des unités du premier degré</th><th>Stratification des unités du deuxième degré</th></tr>
<tr><td rowspan="11">Parcelles ou arbres (ou points ou lignes pour l'estimation des proportions)
422.1</td><td rowspan="6">un degré
.11</td><td rowspan="3">tailles égales (probabilités égales)
.111</td><td rowspan="6">n/a</td><td>non stratifié
.111.1</td><td rowspan="6">n/a</td></tr>
<tr><td>stratifié avant sondage
.111.21</td></tr>
<tr><td>stratifié après sondage
.111.22</td></tr>
<tr><td rowspan="3">tailles différentes (probabilités égales)
.112</td><td>non stratifié
.112.1</td></tr>
<tr><td>stratifié avant sondage
.112.21</td></tr>
<tr><td>stratifié après sondage
.112.22</td></tr>
<tr><td rowspan="5">deux degrés (avec le même nombre d'unités secondaires par unité primaire)
.12</td><td rowspan="4">tailles égales (probabilités égales)
.121</td><td rowspan="3">tailles égales
.121.1</td><td rowspan="2">non stratifié
.121.11</td><td>non stratifié
.121.111</td></tr>
<tr><td>stratifié
.121.112</td></tr>
<tr><td rowspan="2">stratifié
.121.12</td><td>non stratifié
.121.121</td></tr>
<tr><td>stratifié
.121.122</td></tr>
<tr><td>tailles inégales</td><td>non stratifié
.121.2</td><td>non stratifié</td></tr>
<tr><td>tailles différentes (probabilité proportionnelle à la taille)
.122</td><td>tailles égales</td><td>non stratifié</td><td>non stratifié</td></tr>
<tr><td>sondage par points ou par lignes
.2</td><td colspan="5">(Aucun plan de sondage particulier n'est étudié; seules quelques indications sur les caractéristiques essentielles de ces sondages sont données)</td></tr>
</table>

422.1 Unités = parcelles ou arbres (ou points ou lignes pour l'estimation de proportions)

Les sondages basés sur des mesures d'angle faites à partir de prismes ou de relascopes sont exclus de ce type (pour l'étude de ces méthodes, voir le paragraphe 423.2: ''sondages par points ou par lignes'').

422.11 Sondages à un degré

Nous ne considérerons ici que les dispositifs dans lesquels les unités sont tirées avec des probabilités égales. Les symboles utilisés sont les suivants:

f intensité de sondage (ou taux de sondage):($f = \frac{n}{N}$)

f_h intensité de sondage (ou taux de sondage) dans la strate h:($f_h = \frac{n_h}{N_h}$)

h indice d'une strate

i indice d'une unité

(hi indice d'une unité (i) dans une strate (h))

L Nombre total de strates (h = 1 à L)

n nombre d'unités dans l'échantillon

n_h nombre d'unités dans l'échantillon de la strate h

N nombre total d'unités dans la population

N_h nombre total d'unités dans la strate h

p estimation d'une proportion P à partir du sondage

$\hat{R}_1$ estimation de la moyenne par unité de taille du paramètre y (estimation du ''quotient des moyennes''), en utilisant une mesure de la taille x comme paramètre auxiliaire

s_h^2 variance estimée du paramètre y dans la strate h

$$s_h^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n_h}(y_{hi} - \bar{y}_h)^2}{n_h - 1}$$

V valeur exacte de la variance d'un estimateur donné

v valeur estimée, à partir d'un échantillon, de la variance d'un estimateur donné

x paramètre auxiliaire (mesure de la taille) dans un sondage utilisant la méthode du quotient

x_i valeur de x dans la $i^{ième}$ unité

x_{hi} valeur de x dans la $i^{ième}$ unité de la strate h

$\bar{x}$ estimation de la moyenne par unité de x: $\bar{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i$

$\bar{x}_h$ estimation de la moyenne par unité de x dans la strate h: $\bar{x}_h = \frac{1}{n_h}\sum_{i=1}^{n_h} x_{hi}$

X valeur totale de x sur toute la population $X = \sum_{i=1}^{N} x_i$

X_h valeur totale de x sur toute la strate h: $X_h = \sum_{i=1}^{n} x_{hi}$

$\bar{X}$ moyenne exacte, par unité, de x pour toute la population: $\bar{X} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} x_i = \frac{X}{N}$

y paramètre à estimer

y_i valeur de y dans la $i^{ième}$ unité

y_{hi} valeur de y dans la $i^{ième}$ unité de la strate h

$\bar{y}$ estimation de la moyenne par unité de y dans la population: $\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} y_i$

$\bar{y}_h$ estimation de la moyenne de y dans la strate h: $\bar{y}_h = \frac{1}{n_h} \sum_{i=1}^{n_h} y_{hi}$

422.111 Unités de tailles égales

422.111.1 Sondage aléatoire non stratifié (ou ''sondage aléatoire simple'')

Ce plan de sondage a déjà été étudié au pragraphe 311. Rappelons les formules correspondantes:

estimateur de la moyenne par unité:

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^{n} y_i}{n} \qquad (1)$$

estimateur de la variance de $\bar{y}$:

$$v(\bar{y}) = \frac{1-f}{n} \frac{\sum_{i=1}^{n} (y_i - \bar{y})^2}{n-1} = \left(\frac{1}{n} - \frac{1}{N}\right) \frac{\sum_{i=1}^{n} (y_i - \bar{y})^2}{n-1} \qquad (2)$$

Deux remarques:

$$\sum_{i=1}^{n} (y_i - \bar{y})^2 = \sum_{i=1}^{n} y_i^2 - n\bar{y}^2 = \sum_{i=1}^{n} y_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^{n} y_i)^2}{n}$$

Si f est petit (par exemple inférieur à 0,01 = 1 pour cent), 1-f est peu différent de 1, et nous avons:

$$v(\bar{y}) = \frac{\sum_{i=1}^{n} (y_i - \bar{y})^2}{n(n-1)} \qquad (2')$$

Estimation d'une proportion P (d'unités ayant un caractère donné)

Dans ce cas, nous avons $y_i = 1$ ou 0 selon que l'unité i a le caractère donné ou non.

Estimation de la proportion P:

$$p = \frac{a}{n} \qquad (3)$$

où a est le nombre d'unités dans l'échantillon ayant la caractéristique donnée.

Estimation de la variance de p:

$$v(p) = (1-f)\frac{p(1-p)}{n-1} = (1-\frac{n}{N})\frac{p(1-p)}{n-1} \qquad (4)$$

Si $f = \frac{n}{N}$ est petit, on a: $$v(p) = \frac{p(1-p)}{n-1} \qquad (4')$$

Remarque: Dans le cas de l'estimation d'une proportion, si la caractéristique peut être attribuée au point (et non pas à une parcelle autour du point), les unités peuvent être les points. Cela se produit lorsque l'estimation de la surface d'une formation forestière donnée est réalisée d'après photographies ou cartes. Alors N est infini et f est pratiquement nul; la formule à utiliser est donc (4').

422.111.2 Sondage stratifié

422.111.21 Stratification a priori. Les tailles N_h des différentes strates sont parfaitement connues et on effectue le sondage indépendamment dans chaque strate.

Estimation de la moyenne par unité:

$$\bar{y}_{st} = \frac{\sum_{h=1}^{L} N_h \bar{y}_h}{N} \qquad (5)$$

Estimation de la variance de $\bar{y}_{st}$: $$v(\bar{y}_{st}) = \sum_{h=1}^{L} \frac{N_h^2}{N^2} \frac{1-f_h}{n_h} s_h^2 \qquad (6)$$

Cette formule peut s'écrire de différentes façons et peut être simplifiée si le taux de sondage $f_h = \frac{n_h}{N_h}$ est constant d'une strate à l'autre

422.111.22 Stratification a posteriori

On peut déterminer exactement ou presque exactement les tailles N_h des différentes strates, mais il n'existe qu'un seul sondage pour toute la population (et non pas un sondage indépendant dans chaque strate) et les unités sont classées en strates après le comptage. Cela se présente dans un inventaire forestier où:

- l'on connait la taille des strates par photointerprétation;
- on ne fait qu'un seul tirage dans toute la zone à inventorier;
- on ignore - et on ne cherche pas à savoir - à quelle strate appartiennent les unités avant le relevé de l'information sur le terrain.

Estimation de la moyenne par unité:

$$\bar{y}'_{st} = \frac{\sum_{h=1}^{L} N_h \bar{y}_h}{N} \qquad (7)$$

Estimation de la variance de $\bar{y}'_{st}$:

$$v(\bar{y}'_{st}) = \frac{1-f}{n} \sum_{h=1}^{L} \frac{N_h}{N} s_h^2 + \frac{1}{n^2} \sum_{h=1}^{L} \left(1 - \frac{N_h}{N}\right) s_h^2 \qquad (8)$$

(où $n = \sum_{h=1}^{L} n_h$ est le nombre total d'unités de sondage et $f = \frac{n}{N} = \frac{n_h}{N_h}$ quel que soit h, car dans ce cas il n'y a qu'un tirage et donc qu'un taux de sondage).

Si les variances estimées s_h^2 dans les différentes strates sont voisines et si l'échantillon est assez grand, le deuxième terme de l'expression $V(\bar{y}'_{st})$ est petit. Cette estimation est alors peu différente de celle donnée par la formule (6) pour la stratification a priori.

Dans la formule (8), on suppose qu'il n'y a pas d'erreur systématique sur l'estimation de N_h.

422.112 Unités de tailles différentes (estimation par le quotient)

Si les unités statistiques d'une zone forestière à inventorier sont des bandes, des lignes ou des parcelles, elles auront, dans la plupart des cas, des tailles différentes pour une ou plusieurs des raisons suivantes:

- la zone forestière a une forme irrégulière;
- les différentes strates à l'intérieur de la zone ont un contour irrégulier;
- les projections horizontales des unités (ces projections étant, en fait, les unités) ont parfois des dimensions différentes parce que la topographie varie d'une unité à l'autre.

Dans ces cas là, une approche judicieuse est de considérer la taille (surface) de chaque unité comme un paramètre auxiliaire et d'estimer la valeur moyenne du paramètre par unité de taille comme le rapport du paramètre lui-même à ce paramètre auxiliaire (voir paragraphes 322.6 et 33).

422.112.1 Sans stratification

Estimation de la moyenne par unité de taille (quotient des moyennes):

$$\hat{R}_1 = \frac{\sum_{i=1}^{n} y_i}{\sum_{i=1}^{n} x_i} = \frac{\bar{y}}{\bar{x}} \qquad (9)$$

Estimation de la variance de $\hat{R}_1$:

$$v(\hat{R}_1) = \frac{1}{\bar{x}^2} \frac{1-f}{n(n-1)} \left(\sum_{i=1}^{n} y_i^2 + \hat{R}_1^2 \sum_{i=1}^{n} x_i^2 - 2 \hat{R}_1 \sum_{i=1}^{n} x_i y_i \right) \qquad (10)$$

Si l'estimateur de l'échantillon par unité est: $\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i}{n}$, la formule (10) peut s'écrire alors:

$$v(\hat{R}_1) = \hat{R}_1^2 \frac{1-f}{n(n-1)} \left(\frac{\sum_{i=1}^{n} y_i^2}{\bar{y}^2} + \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i^2}{\bar{x}^2} - 2 \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i y_i}{\bar{x} \cdot \bar{y}} \right) \qquad (10')$$

Remarque importante: l'estimation par le quotient $\hat{R}_1$ est une estimation biaisée mais le biais est d'autant plus négligeable que :

- le nombre n d'unités d'échantillonnage est grand,
- la régression de y sur x peut être représentée approximativement par une ligne droite passant par l'origine (ceci est vérifié si y est un volume ou un nombre de tiges et si x est la surface de l'unité) 1/.

422.112.2 Avec stratification

422.112.21 Stratification a priori. Si le nombre n_h d'unités de sondage dans les strates est assez grand et si les rapports $\hat{R}_h$ dans les diverses strates sont suffisamment distincts les uns des autres, on montre que les meilleures estimations du quotient et de la variance de l'estimation sont:

Estimation de la moyenne par unité de taille (estimation par le quotient faite séparément pour le total de chaque strate):

$$\hat{\bar{R}}_{1s} = \sum_{h=1}^{L} \frac{X_h}{X} \hat{R}_{1h} = \sum_{h=1}^{L} \frac{X_h}{X} \frac{\bar{y}_h}{\bar{x}_h} \qquad (11)$$

Estimation de la variance de $\hat{\bar{R}}_{1s}$:

$$v(\hat{\bar{R}}_{1s}) = \frac{1}{\bar{X}^2} \sum_{h=1}^{L} \frac{N_h^2}{n_h} \frac{1-f_h}{n_h(n_h-1)} \left(\sum_{i=1}^{n_h} y_{hi}^2 + \hat{R}_{1h}^2 \sum_{i=1}^{n_h} x_{hi}^2 - 2\hat{R}_{1h} \sum_{i=1}^{n_h} x_{hi} y_{hi} \right) \qquad (12)$$

422.112.22 Stratification a posteriori

Si les variances des $\hat{R}_{1h}$ sont peu différentes dans toutes les strates, et si l'échantillon est assez important, on peut appliquer la formule (12); sinon, on doit adapter la formule (8) à l'estimation par le quotient.

1/ Dans tous les cas, on a: $|\text{biais } \hat{R}_1| \leq \sqrt{v(\hat{R}_1)} \times \frac{\sqrt{V(x)}}{\bar{X}}$

où: $V(\hat{R}_1)$ est la variance exacte de $\hat{R}_1$ (estimée par $v(\hat{R}_1)$)

$V(\bar{x}) = \frac{V(x)}{\sqrt{n}}$ est l'erreur type exacte de $\bar{x}$ (déviation standard de x divisée par $\sqrt{n}$)

422.12 Sondages à deux degrés

On ne considère que le cas où on choisit le même nombre d'unités secondaires par unité primaire.

Toutes les moyennes estimées dans les formules suivantes ont des moyennes par unité secondaire (sauf dans le cas des estimations par le quotient).

Les symboles utilisés sont les suivants :

f_1 intensité de sondage du premier degré: $f_1 = \frac{n}{N}$ (unités primaires égales)

f_2 intensité de sondage du deuxième degré: $f_2 = \frac{m}{M}$ (unités primaires égales et même intensité de sondage au deuxième degré dans toutes les unités primaires)

f_{2ki} intensité de sondage du deuxième degré dans la strate ki de l'unité primaire i

h indice d'une strate (stratification des unités primaires)

i indice d'une unité primaire

j indice d'une unité secondaire

(ij indice d'une unité secondaire dans une unité primaire)

ki indice d'une strate (stratification des unités secondaires) dans l'unité primaire i

L nombre total de strates pour les unités primaires (h = 1 à L)

L_i' nombre total de strates pour les unités secondaires dans l'unité primaire i (ki = 1 à L_i')

m nombre d'unités secondaires dans l'échantillon de chaque unité primaire

m_{ki} nombre d'unités secondaires dans la strate ki de l'unité primaire i

M nombre total d'unités secondaires d'une unité primaire

M_{ki} nombre total d'unités secondaires dans la strate ki de l'unité primaire i

n nombre d'unités primaires dans l'échantillon

n_h nombre d'unités primaires dans l'échantillon de la strate h

N nombre total d'unités primaires dans la population

N_h nombre total d'unités primaires dans la strate h

p estimation d'une proportion P dans tout l'échantillon

p_i estimation d'une proportion P dans l'échantillon de l'unité primaire i

s_{ki}^2 estimation de la variance du paramètre y dans la strate ki de l'unité primaire i

$$s_{ki}^2 = \frac{\sum_{j=1}^{m_{ki}} (y_{kij} - \bar{y}_{ki})^2}{m_{ki} - 1}$$

x paramètre auxiliaire (mesure de taille) dans un sondage avec estimation par le quotient

x_{ij} valeur de x dans l'unité secondaire j de l'unité primaire i

$\bar{x}_i$ estimation de la moyenne par unité secondaire de x dans l'unité primaire i:

$$\bar{x}_i = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^{m} x_{ij}$$

$\bar{\bar{X}}$ valeur moyenne exacte de x par unité secondaire pour toute la population

y paramètre à estimer

y_{ij} valeur de y dans la $j^{ème}$ unité secondaire de l'unité primaire i

y_{hij} valeur de y dans la $j^{ème}$ unité secondaire de la $i^{ème}$ unité primaire de la strate h

y_{kij} valeur de y dans la $j^{ème}$ unité secondaire de la strate ki dans la $i^{ème}$ unité primaire

$\bar{y}_i$ estimation de la moyenne par unité secondaire de y dans l'unité primaire i:

$$\bar{y}_i = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^{m} y_{ij}$$

$\bar{y}_{ki}$ estimation de la moyenne de y par unité secondaire dans la strate ki (unité primaire i):

$$\bar{y}_{ki} = \frac{1}{n_{ki}} \sum_{j=1}^{n_{ki}} y_{kij}$$

$\bar{y}_{NSi}$ estimation de la moyenne de y par unité secondaire dans l'unité primaire i (avec stratification dans les unités primaires):

$$\bar{y}_{NSi} = \sum_{ki=1}^{L_i'} \frac{M_{ki}}{M} \bar{y}_{ki}$$

$\bar{\bar{y}}_h$ estimation de la moyenne de y par unité secondaire dans la strate h:

$$\bar{\bar{y}}_h = \frac{1}{n_h} \sum_{i=1}^{n_h} \frac{1}{m} \sum_{j=1}^{m} y_{hij}$$

$\bar{\bar{y}}_{NSh}$ estimation de la moyenne de y par unité secondaire pour les unités primaires de la strate h (avec stratification dans les unités primaires):

$$\bar{\bar{y}}_{NSh} = \frac{1}{n_h} \sum_{i=1}^{n_h} \bar{y}_{NSi}$$

422.121 Unités primaires de tailles égales

Dans les dispositifs cités ci-dessous, les unités primaires sont tirées avec probabilités égales

422.121.1 Unités secondaires de tailles égales

422.121.11 Les unités primaires ne sont pas stratifiées

422.121.111 Les unités secondaires dans les unités primaires ne sont pas stratifiées

Estimation de la valeur moyenne par unité secondaire:

$$\bar{\bar{y}} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \bar{y}_i}{n} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} y_{ij}}{nm} \qquad (13)$$

Estimation de la variance de $\bar{\bar{y}}$:

$$v(\bar{\bar{y}}) = \frac{1-f_1}{n} \frac{\sum_{i=1}^{n} (\bar{y}_i - \bar{\bar{y}})^2}{n-1} + \frac{f_1(1-f_2)}{nm} \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} \frac{(y_{ij} - \bar{y}_i)^2}{n(m-1)} \qquad (14)$$

Estimation d'une proportion:

Dans ce cas, les valeurs du paramètre y dans les unités secondaires sont égales à 0 ou 1 (y_{ij} = 1 ou 0). On peut simplifier les formules précédentes.

Estimation de la proportion P (valeur moyenne de y par unité secondaire):

$$p = \frac{\sum_{i=1}^{n} p_i}{n} \qquad (13')$$

(où p_i est l'estimation de la proportion pour l'unité primaire i: $p_i = \frac{a_i}{m}$, a_i étant le nombre d'unités dans l'échantillon de l'unité primaire i pour lesquelles $y_{ij} = 1$).

Estimation de la variance de p

$$v(p) = \frac{1-f_1}{n} \frac{\sum_{i=1}^{n} (p_i - p)^2}{n-1} + \frac{f_1(1-f_2)}{nm} \sum_{i=1}^{n} \frac{p_i(1-p_i)}{n(m-1)} \qquad (14')$$

Si les unités secondaires sont des points, le nombre, M, d'unités secondaires par unité primaire est infini et $f_2 = 0$.

422.121.112 Stratification des unités secondaires dans les unités primaires (avant sondage)

Estimation de la moyenne par unité secondaire:

$$\bar{\bar{y}}_{NS} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \sum_{ki=1}^{L_i'} \frac{M_{ki}}{M} \bar{y}_{ki} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \bar{y}_{NSi} \qquad (15)$$

Estimation de la variance de $\bar{\bar{y}}_{NS}$

$$v(\bar{\bar{y}}_{NS}) = \frac{1-f_1}{n} \frac{\sum_{i=1}^{n} (\bar{y}_{NSi} - \bar{\bar{y}}_{NS})^2}{n-1} + \frac{f_1}{n^2} \sum_{i=1}^{n} \sum_{ki=1}^{L_i'} \frac{M_{ki}^2}{M^2} \frac{1-f_{2ki}}{m_{ki}} s_{ki}^2 \qquad (16)$$

La formule (16) ressemble à (14) et se ramène à cette dernière lorsqu'il n'y a pas de stratification dans les unités primaires. La nature et le nombre des strates peuvent être différents dans les diverses unités primaires.

422.121.12 Les unités primaires sont stratifiées a priori

422.121.121 Les unités secondaires dans les unités primaires ne sont pas stratifiées

Estimation de la moyenne par unité secondaire:

$$\bar{\bar{y}}_S = \sum_{h=1}^{L} \frac{N_h}{N} \cdot \frac{\sum_{i=1}^{n_h} \sum_{j=1}^{m} y_{hij}}{n_h m} = \sum_{h=1}^{L} \frac{N_h}{N} \cdot \bar{\bar{y}}_h \qquad (17)$$

Estimation de la variance de $\bar{\bar{y}}_S$:

$$v(\bar{\bar{y}}_S) = \sum_{h=1}^{L} \left(\frac{N_h}{N}\right)^2 v(\bar{\bar{y}}_h) \qquad (18)$$

$v(\bar{\bar{y}}_h)$ est obtenu par la formule (14) où les unités primaires considérées sont celles qui appartiennent à la strate h.

422.121.122 Les unités secondaires dans les unités primaires sont stratifiées a priori

Notations: L'indice h se rapporte à la stratification des unités primaires et l'indice k à celle des unités secondaires. Ces deux stratifications ne doivent pas se chevaucher. Dans un plan de sondage forestier, la stratification des unités primaires pourra être géographique (par bassins hydrographiques) ou basée sur une classification grossière par types de végétation, alors que la stratification des unités secondaires dans chaque unité primaire pourra se faire d'après la densité et la hauteur des arbres dominants (''condition classes'')

Estimation de la moyenne par unité secondaire:

$$\bar{\bar{y}}_{SS} = \sum_{h=1}^{L} \frac{N_h}{N} \bar{\bar{y}}_{NS_h} \qquad (19)$$

$\bar{\bar{y}}_{NS_h}$ se calcule en appliquant la formule (15) aux unités de la strate h.

Estimation de la variance de $\bar{y}_{SS}$:

$$v(\bar{y}_{SS}) = \sum_{h=1}^{L} \left(\frac{N_h}{N}\right)^2 v(\bar{y}_{NS_h}) \qquad (20)$$

$v(\bar{y}_{NS_h})$ se calcule en appliquant la formule (16) aux unités de la strate h.

422.121.2 Unités secondaires de tailles inégales

L'estimation par le quotient est alors utilisée comme dans un sondage à un degré, la taille de l'unité secondaire étant le paramètre auxiliaire. Nous ne considérerons que le cas où il n'y a aucune stratification, ni des unités primaires, ni des unités secondaires

Estimation de la moyenne par unité de taille: (''quotient des moyennes'')

$$\hat{R}_2 = \frac{\sum_{i=1}^{n} \bar{y}_i}{\sum_{i=1}^{n} \bar{x}_i} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} y_{ij}}{\sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} x_{ij}} \qquad (21)$$

Estimation de la variance de $\hat{R}_2$:

$$v(\hat{R}_2) = \left(\frac{1}{\bar{X}}\right)^2 \frac{1-f_1}{n(n-1)} \left[\sum_{i=1}^{n} \bar{y}_i^2 + \hat{R}_2^2 \sum_{i=1}^{n} \bar{x}_i^2 - 2\hat{R}_2 \sum_{i=1}^{n} \bar{x}_i \cdot \bar{y}_i \right]$$
$$+ \left(\frac{1}{\bar{X}}\right)^2 \frac{f_1(1-f_2)}{nm} \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} \frac{\left[(y_{ij}-\bar{y}_i)^2 + \hat{R}_2^2 (x_{ij}-\bar{x}_i)^2 - 2\hat{R}_2 (y_{ij}-\bar{y}_i)(x_{ij}-\bar{x}_i) \right]}{n(m-1)} \qquad (22)$$

422.122 Unités primaires de tailles différentes

Nous n'étudierons que le cas où les unités primaires sont tirées avec une probabilité proportionnelle à leur taille, sans qu'il y ait eu de stratification préalable des unités primaires ou secondaires et où les unités secondaires sont de taille identique. Nous rappelons qu'on suppose un nombre identique d'unités secondaires par unité primaire.

Estimation de la moyenne par unité secondaire:

$$\bar{y}_{PPS} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \bar{y}_i = \frac{1}{nm} \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} y_{ij} \qquad (23)$$

La formule est identique à (13) qui donne l'estimation $\bar{y}$ dans le cas d'un sondage à deux degrés avec unités primaires égales et tirées avec probabilités égales (moyenne non pondérée de l'échantillon par unité secondaire).

Estimation de la variance de $\bar{y}_{,PS}$

$$v(\bar{y}_{PPS}) = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^{n} (\bar{y}_i - \bar{y}_{PPS})^2 \qquad (24)$$

La simplicité des formules (23) et (24) et l'efficacité habituelle de ce type de sondage le rendent particulièrement intéressant.

422.2 Sondages par points (ou par lignes)

Ce type de sondage est utilisé dans le travail de terrain d'un inventaire forestier. Les unités du dernier degré sont des points (ou lignes) et ne correspondent pas à une surface ou à un arbre donnés. A chaque point, les arbres (qui ne sont pas les unités de sondage) sont tirés avec une probabilité proportionnelle à l'une des caractéristiques suivantes:

- surface terrière dans les ''sondages par points horizontaux''
- diamètre dans les ''sondages par lignes horizontaux''
- carré de la hauteur dans les ''sondages par points verticaux''
- hauteur dans les ''sondages par lignes verticaux''.

Ainsi, à chaque arbre correspond une surface de parcelle proportionnelle à ce caractère et plus ce caractère est important, plus la parcelle est grande. C'est pour cela que ce type de modèle est parfois appelé en anglais ''polyareal plot sampling''.

Ces méthodes et, en particulier, ''le sondage par points horizontaux'', se sont développées rapidement au cours des vingt dernières années dans le domaine forestier, en Amérique du Nord (en utilisant des dioptres ou des prismes), et en Europe avec le relascope à miroir. Leur emploi en forêt tropicale est limité par des facteurs d'ordre pratique, tels que l'opacité du sous-bois et la hauteur variable des contreforts. De plus, ces méthodes ne donnent pas directement une image représentative de la forêt en chaque point, car les arbres ne sont pas tirés avec des probabilités égales. Cette insuffisance est plus grave dans le cas de forêts tropicales mélangées pour lesquelles il est intéressant de connaître la répartition des essenceset des classes de diamètre en chaque point de sondage. Cette méthode a cependant été utilisée, avec succès, dans quelques cas et peut être recommandée en région tropicale pour l'étude de peuplements homogènes (forêts de pins ou plantations).

A l'exception de cette différence dans la nature des unités de sondage, tous les modèles décrits précédemment sont applicables. En particulier, si les lignes ont des longueurs différentes, il est bon de faire une estimation par le quotient en prenant la longueur de la ligne comme paramètre auxiliaire. Comme dans le cas où les unités sont des parcelles ou des arbres, ce groupement en grappes peut être utilisé dans tous les types de dispositifs.

Il n'est donc pas nécessaire de reprendre tous les dispositifs décrits plus haut et nous nous bornerons à indiquer les modifications à apporter aux formules.

- Valeur du paramètre en un point (ou pour une ligne)

Prenons le cas d'un sondage par points horizontal. Le point i étant l'unité de sondage du dernier degré, la valeur y_i par unité de surface du paramètre y dans cette unité sera:

$$y_i = y_{i,1} \left(\frac{F}{M_{i,1}}\right) + y_{i,2} \left(\frac{F}{M_{i,2}}\right) + \ldots + y_{i,k} \left(\frac{F}{M_{i,k}}\right) + \ldots + y_{i,pi} \left(\frac{F}{M_{i,pi}}\right)$$

où pi est le nombre total d'arbres tirés au point i

$y_{i,k}$ est la valeur du paramètre pour l'arbre k au point i (si y est un nombre de tiges $y_{i,k}$ vaudra 1 quel que soit k)

$BA_{i,k}$ est la surface terrière du $k^{ème}$ arbre au point i

F est le facteur de surface terrière (égal à $F = 10\,000 \sin^2 \frac{\theta}{2}$, en mètres carrés (surface terrière) par hectare, où θ est l'angle de visée).

Des formules semblables sont applicables aux trois autres dispositifs dans lesquels les surfaces terrières des arbres sont remplacées par d'autres caractères (diamètre, carré de la hauteur ou hauteur) avec les valeurs correspondantes du facteur F.

- Nombre d'unités - intensités de sondage

Au sens strict, comme la population (et/ou la strate, et/ou les unités intermédiaires) est une surface forestière, la taille des unités doit se mesurer en surface. Mais, comme une unité n'a pas de surface définie (il y a autant de surfaces que de valeurs du paramètre) le nombre total d'unités du dernier degré dans la population (ou dans une quelconque de ses divisions) ne peut être défini. Si le nombre total d'arbres tirés dans toutes les unités est petit par rapport au nombre total d'arbres dans la population (ou dans la subdivision étudiée)

- on admettra que l'intensité de l'échantillonnage au dernier degré sera suffisamment faible pour être considérée comme égale à zéro

- on admettra que le nombre d'unités finales au dernier degré, par unité intermédiaire du degré précédent, sera si grand que son inverse pourra être considéré comme égal à zéro.

Une analyse approfondie des principes des sondages par points ou lignes est donnée dans ''Forest mensuration'' B. Husch, Ch. I. Miller et Th. W. Beers (pages 254-291).

423 Sondages systématiques

423.1 Considérations générales

Par sondage systématique nous entendons tous les sondages où la sélection des unités d'un ou de tous les degrés se fait d'une façon systématique. Rappelons que dans un sondage systématique, seule la première unité est tirée au hasard, les autres s'en déduisant automatiquement.

Dès qu'il y a tirage systématique des unités, la théorie des sondages n'est plus strictement applicable:

- Seule une unité est tirée au hasard, les autres unités n'étant pas choisies indépendamment (en termes statistiques, on dit que chacune d'elles ne correspond pas à un ''degré de liberté''): on ne peut alors estimer la variance. Ceci se comprend si l'on regarde tout l'échantillon systématique comme une grappe: nous avons vu que seule la grappe peut être considérée comme une unité d'échantillonnage (et non pas les unités constitutives) or, la variance ne peut être calculée à partir d'une seule valeur du paramètre.

- Dès que la première unité est tirée, les unités qui n'appartiennent pas à l'échantillon ont une probabilité nulle d'être tirées et les autres ont une probabilité égale à 1. Ainsi, la plupart des unités de la population sont exclues définitivement du tirage du fait de l'élément de prédétermination inhérent à ce type de sondage. Cela est contraire à un des principes de base de la théorie des sondages.

On doit remarquer de plus que tout calcul de la variance de la moyenne se complique du fait qu'il peut y avoir dépendance entre les valeurs que prend le paramètre dans des couples d'unités voisines. Dans ce cas, l'estimation de la variance de la moyenne estimée n'est pas en relation simple avec la variance de la valeur du paramètre dans une unité (voir paragraphe 322.3) et il devient pratiquement impossible d'estimer la variance de la moyenne.

A tous les dispositifs de sondage aléatoire cités au paragraphe 422, à l'exception du modèle à deux degrés avec probabilités inégales, correspondent un ou plusieurs plans systématiques. En particulier, il existe plusieurs plans systématiques possibles correspondant à chaque dispositif aléatoire à deux degrés, selon que l'on fait le tirage systématique au premier degré, au deuxième, ou aux deux.

423.2 Modification aux formules applicables aux sondages aléatoires

423.21 Estimation des moyennes

L'estimation de la moyenne par unité (ou par unité de taille) d'un paramètre dans un sondage systématique est, dans la plupart des cas, donnée par la même relation que dans le sondage aléatoire correspondant. Les formules données au paragraphe 422 sont, en général, applicables.

Cependant, il convient d'être prudent quand on estime la moyenne de certains paramètres. S'il y a une variation périodique des valeurs d'un paramètre et si le modèle systématique a la même ''longueur d'onde'', l'estimation de la moyenne pourra avoir un biais important. Ceci peut se produire, par exemple, si la topographie est, d'une manière générale, une succession de crêtes et de vallées parallèles, et si la disposition systématique des unités d'échantillonnage est telle que les unités soient pour la plupart sur les crêtes (ou dans les vallées). La valeur moyenne du paramètre sera alors surestimée (ou sous-estimée).

Afin d'éviter de telles coïncidences fâcheuses, on doit vérifier, avec soin, que les distances entre les unités de sondage ne sont pas égales à la (ou un multiple de la) ''longueur d'onde'' d'une variation périodique quelconque de la population.

423.22 Estimation des variances des moyennes estimées

423.221 Paramètres ''aléatoires''

La distribution des valeurs d'un paramètre donné dans les unités d'une population peut être ''aléatoire'', ce qui signifie que la corrélation entre les valeurs que prend un paramètre dans deux unités différentes est faible ou nulle et ceci quelle que soit la distance entre ces deux unités, (les covariances correspondantes sont nulles - voir paragraphe 322.2). C'est ainsi le cas de quelques paramètres relatifs à des essences faiblement représentées dans certaines forêts tropicales mélangées (dont la loi de distribution se rapproche de la loi de Poisson).

Pour de tels paramètres, on peut calculer les variances des moyennes estimées avec la même formule que pour le dispositif aléatoire correspondant.

423.222 Autres paramètres

De nombreux statisticiens ont étudié ce problème et, bien que la théorie des sondages ne fournisse pas d'estimation parfaitement satisfaisante des variances, certains calculs donnent d'assez bonnes estimations. Nous citerons, ci-dessous, quelques-uns des plus courants. Pour simplifier, nous nous bornerons au sondage systématique simple à un degré. On peut étendre facilement ce cas à des dispositifs systématiques stratifiés et/ou à deux degrés.

423.222.1 Unités de même taille

Première méthode: stratification en strates se chevauchant partiellement et composées chacune de deux unités:

a) supposons que nous ayons une seule ligne d'unités de sondage (parcelles ou arbres alignés) ou que l'échantillon soit formé d'unités égales, équidistantes et parallèles, (bandes ou lignes de parcelles de relevé). Une stimation de la variance sera :

$$v(\bar{y}) = \frac{1-f}{n} \frac{\sum_{i=1}^{n-1} (y_{i+1} - y_i)^2}{2(n-1)} \qquad (24)$$

où $\bar{y}$ est la moyenne de l'échantillon (estimation de la moyenne du paramètre par unité)

n est le nombre d'unités de sondage

y_{i+1}, y_i sont les valeurs respectives du paramètre dans les $(i+1)^{ème}$ et $i^{ème}$ unités de sondage

$f = \frac{n}{N}$ est l'intensité de sondage (N = nombre total d'unités dans la population).

Cette formule est établie en considérant que toute la population se divise en (n-1) strates, comprenant chacune deux unités de sondage voisines, chaque unité appartenant à deux strates qui se recouvrent, partiellement, à l'exception de la première et de la dernière.

b) Si l'on a plusieurs lignes équidistantes d'unités, il vaut mieux considérer une autre stratification des lignes: chaque ligne appartiendra à une strate dont la taille est proportionnelle au nombre d'unités de la ligne.

La formule sera alors:

$$\bar{y} = \sum_{h=1}^{m} \frac{N_h}{N} \bar{y}_h = \sum_{h=1}^{m} \frac{N_h}{N} \sum_{i=1}^{n_h} \frac{y_{ih}}{n_h} \simeq \frac{\sum_{h=1}^{m} \sum_{i=1}^{n_h} y_{ih}}{n} \qquad (25)$$

où m est le nombre de lignes

N_h est le nombre total d'unités dans la strate h (correspondant à la ligne h)

N est le nombre total d'unités dans la population (zone inventoriée)

$$N = \sum_{h=1}^{m} N_h$$

$\frac{N_h}{N}$ peut être approché par $\frac{n_h}{n}$ (où n_h et n sont respectivement, le nombre d'unités le long de la ligne h et le nombre total d'unités

$$n = \sum_{h=1}^{h} n_h)$$

y_{ih} et $\bar{y}_h$ sont les valeurs respectives de y dans l'unité de sondage i de la ligne h et de la moyenne estimée de y par unité pour la ligne h:

$$\bar{y}_h = \frac{1}{n_h} \sum_{i=1}^{n_h} y_{ih}$$

Pour chaque strate, la variance $v(\bar{y}_h)$ peut être estimée à partir de la formule (24) où f,n et la différence $(y_{i+1} - y_i)$ correspondent à cette strate. La variance estimée de $\bar{y}$ sera donc:

$$v(\bar{y}) = \sum_{h=1}^{m} \frac{N_h^2}{N^2} v(\bar{y}_h) \simeq \sum_{h=1}^{m} \frac{n_h^2}{n^2} v(\bar{y}_h) \qquad (26)$$

Deuxième méthode : Stratification avec des strates ne se chevauchant pas et formées de 4 unités (pour des populations à deux dimensions et de forme uniquement carrée ou rectangulaire).

Au lieu de considérer des strates contenant deux unités de sondage, nous considérerons des strates de quatre unités de sondage (deux unités sur une ligne et deux unités correspondantes sur la ligne parallèle suivante). Si on prend des strates ne se recouvrant pas, on obtient:

$$v(\bar{y}) = \frac{1-f}{n} \frac{1}{3n'} \left[\sum_{i=1}^{n} y_i^2 - 4 \sum_{j=1}^{n'} \bar{y}_j^2 \right] \qquad (27)$$

où $\bar{y}_j$ est la moyenne du paramètre dans la strate j

n' est le nombre de strates: $n' \# \frac{n}{4}$

les autres notations ayant la même signification que plus haut.

423.222.2 Unités de tailles différentes

Nous nous bornerons à l'étude du cas d'une ligne d'unités inégales ou à celui d'unités équidistantes, parallèles, de tailles inégales, (par exemple, des bandes de même largeur mais de longueurs différentes). Nous utiliserons la première méthode de stratification avec des strates de deux unités et se recouvrant partiellement et nous prendrons la surface x, d'une unité, comme paramètre auxiliaire.

Estimation de la moyenne du paramètre par unité de taille (surface):

$$\hat{R}_{1,sys} = \frac{\sum_{i=1}^{n} y_i}{\sum_{i=1}^{n} x_i} \qquad (28)$$

(identique à (9))

Estimation de la variance de cette estimation :

$$v(\hat{R}_{1,sys}) = \frac{1}{\bar{x}^2} \frac{1-f}{2n(n-1)} \left[\sum_{i=1}^{n-1} (y_{i+1} - y_i)^2 + \hat{R}^2_{1,sys} \sum_{i=1}^{n-1} (x_{i+1} - x_i)^2 - 2\hat{R}_{1,sys} \sum_{i=1}^{n-1} (x_{i+1} - x_i)(y_{i+1} - y_i) \right] \quad (29)$$

(où les notations sont les mêmes que celles du paragraphe 422.112).

CHAPITRE IV

UTILISATION DE LA TELEDETECTION ET DES CARTES POUR L'ESTIMATION DES SURFACES EN INVENTAIRE FORESTIER

CHAPITRE IV

UTILISATION DE LA TELEDETECTION ET DES CARTES POUR L'ESTIMATION DES SURFACES EN INVENTAIRE FORESTIER

1 Introduction

La plupart des inventaires forestiers ont pour but d'obtenir des estimations satisfaisantes des valeurs totales des paramètres (en particulier les volumes de bois) pour tout ou partie de la zone inventoriée. Ces valeurs sont calculées à partir de l'estimation des surfaces et des valeurs moyennes de ces paramètres par unité de surface.

A la fois les surfaces et les valeurs moyennes des paramètres par unité de surface peuvent s'estimer à partir de photographies aériennes (et de cartes) et/ou de mesures et observations au sol, par recensement exhaustif ou par échantillonnage.

On n'étudiera pas ici l'estimation des moyennes des paramètres par unité de surface à l'aide de photographies aériennes (ou d'autres images de la télédétection). En effet, ces techniques sont utilisables essentiellement pour des forêts homogènes tempérées et des plantations et n'ont donc que peu d'applications dans les pays tropicaux, tout au moins à l'heure actuelle. La difficulté d'identifier les essences et l'impossibilité d'évaluer les défauts sur des photographies aériennes, ainsi que la faible corrélation existant entre les caractéristiques des couronnes et celles des tiges limitent beaucoup les possibilités d'utiliser la photogrammétrie pour inventorier les forêts tropicales. On cite toutefois à l'annexe II quelques ouvrages qui pourront être consultés au cas où ces méthodes pourraient s'avérer utiles sous les tropiques (par exemple pour des plantations).

Comme l'indique son titre, le présent chapitre se borne à étudier l'utilisation de la télédétection et de documents cartographiques pour l'estimation des surfaces, bien que celle-ci ne se fasse pas exclusivement avec ces méthodes, qui sont souvent complétées ou même remplacées par des mesures et observations au sol.

Les photographies aériennes classiques étaient, autrefois, l'unique outil de la télédétection en inventaire forestier et elles resteront certainement le plus important pendant longtemps encore. Dans la première partie du présent chapitre, on se bornera à l'étude des photographies aériennes conventionnelles utilisées en inventaire forestier, mais le sous-chapitre 6 est consacré à la description et aux applications des nouvelles méthodes de télédétection dans les inventaires forestiers.

On supposera, dans tout le chapitre, qu'il existe une bonne cartographie de la topographie (ou seulement de la planimétrie) de toute la zone à une échelle suffisante 1/. Cela permettra de négliger l'erreur d'estimation sur la surface totale à inventorier. Si cela est impossible et si l'inventaire à réaliser n'est pas une simple reconnaissance ou s'il ne s'applique pas à une surface suffisamment petite pour qu'on puisse en faire le levé topographique au sol, le premier objectif de l'inventaire sera de demander à un institut cartographique de faire cette cartographie à partir des images de télédétection disponibles, avec des stéréorestituteurs de premier ordre. Nous n'étudierons pas ici ce procédé, ni les méthodes d'étude topograhique qui sont traitées dans des manuels et livres spécialisés.

Si, pour des raisons financières ou autres, cette cartographie n'est pas possible, l'erreur qui en résultera pour la surface totale augmentera les erreurs des estimations des volumes totaux (ou des totaux des autres paramètres).

1/ "Suffisante" par rapport à la dimension de la zone à inventorier et à l'intensité de l'inventaire.

2 Classification des forêts et de l'occupation des sols

21 Critères de classification

Etant donné une forêt à inventorier, il faut en général donner non seulement les résultats globaux, mais aussi les chiffres correspondant aux diverses parties de la forêt. Pour la subdiviser, plusieurs types de critères peuvent être employés, par exemple:

- Les critères fondés sur les relations végétation/environnement et qui tiennent compte des facteurs du milieu tels que le climat, l'altitude et le sol. La classification correspondante n'indique généralement pas l'occupation réelle des sols mais elle est utile pour l'aménagement des forêts et des terres. Les informations recueillies pour ce travail de classification permettent d'agir en toute connaissance de cause quand on décide de maintenir une forêt ou de la supprimer au profit de l'agriculture, quand on choisit les essences et les stations pour d'éventuels reboisements, ou quand on détermine les traitements sylvicoles.

- Les critères fondés sur l'occupation actuelle des sols; c'est la classification la plus importante, puisqu'elle sépare les forêts des autres types de végétation. Dans cette classification, les zones forestières sont réparties en de grandes classes, qui sont universellement acceptées.

- Les critères intéressant l'aménagement forestier, tels que:

  - le régime foncier et le type de propriété: s'il existe, par exemple, des forêts publiques et privées dans la zone inventoriée, il faudra presque certainement donner les résultats séparément pour les unes et pour les autres, de même d'ailleurs que pour les forêts en concession s'il y en a;

  - l'administration: il peut être nécessaire de ventiler les résultats par unités administratives (districts, communes, régions, départements, provinces, et états) si la zone inventoriée s'étend sur plusieurs de ces unités;

  - physiographie et accessibilité: les résultats devront être donnés séparément pour chaque unité forestière isolée, chaque bassin versant, chaque type topographique différent, etc., les unités correspondantes devant être aménagées séparément;

  - unités d'aménagement: en plus des caractères précédents, il peut y avoir une classification spéciale pour l'aménagement et/ou l'exploitation (unités d'aménagement à rendement soutenu, blocs d'exploitation, etc.). Par exemple la classification en forêts non exploitées et déjà exploitées est capitale pour la préparation des règlements d'exploitation dans de nombreuses zones tropicales: les résultats doivent être donnés séparément pour chacune des classes.

- Les critères intéressant la stratification statistique: si, dans la même unité d'aménagement - ou d'occupation actuelle - ou de vocation - des sols, il y a des variations significatives des paramètres à estimer entre les diverses unités forestières, il est utile de les stratifier en conséquence afin de diminuer l'erreur d'échantillonnage des estimations et de rendre plus efficace le plan d'inventaire. La stratification sera meilleure si elle est faite a priori (voir paragraphe 411.4, chapitre III). Cette stratification est, en général, réalisée par photointerprétation et elle est fondée sur des critères pouvant être évalués sur des photographies aériennes. Ces critères sont, par exemple, les essences dominantes ou la hauteur et la densité des arbres dominants. Ces dernières classes sont souvent appelées "condition classes". Les résultats obtenus au niveau de ces classes peuvent s'avérer sans intérêt car celles-ci ne sont en principe que des strates utilisées pour l'échantillonnage. Ils sont cependant utiles si cette classification est ensuite utilisée en vue de l'aménagement.

22 Classifications fondées sur les relations végétation/environnement

Dans la plupart des cas, cette classification n'est pas utilisée pour évaluer l'occupation actuelle des sols, qui ne coïncide généralement pas avec les types végétaux potentiels ou climax utilisés dans ces classifications. Mais elle peut être utile dans un inventaire forestier, pour faire une première stratification générale des forêts à inventorier, surtout lorsque la végétation primaire n'a pratiquement pas été remaniée.

De nombreux systèmes de classification et de cartographie fondés sur les relations végétation/environnement se sont développés, tant au niveau mondial qu'au niveau régional (en Afrique, en Asie du Sud-Est et en Amérique du Sud). Ils sont en général fondés sur diverses méthodes d'analyse des facteurs complexes qui définissent l'environnement et plus particulièrement les facteurs climatiques: pluviométrie, température, évapo-transpiration, etc. Dans le cadre d'un inventaire forestier, l'expert doit tout d'abord se familiariser avec le système de classification national employé sur place et ensuite, dans la mesure du possible, établir les correspondances avec le type de classification (1) régional et (2) mondial approprié.

Il n'est pas question d'évaluer ici les avantages et les inconvénients des diverses classifications mondiales et régionales. Au niveau de chaque projet d'inventaire, il faut d'abord recenser les cartes de la végétation et climatiques qui existent déjà à l'échelon régional et national. Plusieurs cartes des systèmes de classification mondiaux et régionaux sont publiées; parmi les plus récentes, citons:

1. Carte de la végétation de l'Afrique, publiée sous les auspices de l'Association pour l'étude taxonomique de la flore d'Afrique tropicale'' avec l'aide de l'Unesco, par ''l'Oxford University Press'', 1958.

2. Atlas de l'Enquête agro-écologique en Afrique occidentale,réalisé par J. Papadakis sous les auspices de la FAO en 1966 (qui contient aussi une classification climatique en corrélation avec les types végétaux).

3. Une série de cartes de certains pays de l'Asie du Sud-Est, de l'Afrique et de l'Europe, publiée par Gaussen et ses collaborateurs, comme les publications de l'Institut français de Pondichéry qui couvrent notamment l'Inde, Ceylan et Madagascar.

4. Cartes climatiques mondiales (systèmes de Thornthwaite, de Swain et de Köppen).

5. Cartes climatiques et végétales de l'Amérique latine par Holdridge.

6. Cartes mondiales de la végétation au 1/25 000 000e par Schmithüsen.

L'Unesco, l'Organisation météorologique mondiale (OMM) et la FAO, se sont plus particulièrement intéressés et ont dirigé la préparation de cartes mondiales et régionales portant sur des aspects écologiques spécialisés (y compris les sols), à savoir, la carte agro-écologique de Papadakis déjà citée, une étude de l'''Agroclimatologie des zones semi-arides du Sahara en Afrique occidentale'' par J. Cochemé et P. Franquin et qui a été publiée en 1967 conjointement par la FAO, l'Unesco et l'OMM et une carte mondiale des sols établie par la FAO terminée en 1974. La FAO n'a pas recommandé l'adoption d'un système particulier pour la classification de la végétation au niveau mondial ou régional, mais le système Holdridge paraît être le plus intéressant parce qu'il est simple et facilement adaptable aux fins de l'inventaire forestier (cf. Holdridge - 1967). Il a été utilisé pour l'élaboration des cartes écologiques de plusieurs pays d'Amérique latine.

23 Classification de l'''utilisation actuelle des sols'' utilisée dans les opérations d'inventaire de la FAO

231 Un système de classification des surfaces a été élaboré en septembre 1967 au siège de la FAO lors d'une conférence réunissant des experts en inventaire forestier. Cette classification a été recommandée pour les projets d'inventaire de la FAO (avec la

possibilité d'introduire des subdivisions éventuellement nécessaires pour des projets particuliers). On a essayé de l'harmoniser avec les normes et définitions utilisées par la FAO dans son inventaire forestier mondial. L'élaboration de statistiques mondiales, régionales et nationales des ressources forestières sera plus facile quand les diverses administrations l'auront adoptée.

Les étapes de la classification, les définitions et les explications sont les suivantes:

Les étapes de la classification	Définition ou explication
1. Classer la superficie en: I. Superficie des terres II. Superficie des eaux intérieures	Définir les bases du classement (photographies aériennes, cartes existantes, etc.) et en préciser la date. Classer les mangroves et les palmeraies côtières dans les terres.
2. Ventiler la superficie des terres en: A. Superficie forestière B. Autres superficies boisées C. Superficies non boisées	Considérer comme forêts: toutes les terres portant un ''couvert forestier'' (y compris les bambousaies et les palmeraies naturelles), c'est-à-dire portant des arbres dont les couronnes couvrent plus de 20 pour cent de la surface, et dont l'utilisation principale est forestière. Pour définir l'arbre, se reporter à la définition du livre ''Terminology of forest science, technology, practice and products'' (publié par F.C. Ford Robertson avec l'autorisation du comité mixte FAO/IUFRO de la Bibliographie et de la Terminologie Forestières): arbre: ''une plante ligneuse pérenne de taille en principe grande et qui possède un tronc unique bien défini portant une couronne plus ou moins développée'' Ces forêts comprennent: a) Les forêts publiques et privées; b) Toutes les plantations même celles où une seule révolution est prévue, utilisées principalement à des fins forestières; c) Les superficies provisoirement déboisées, les jeunes peuplements naturels en régération et toutes les plantations établies à des fins forestières mais dont la couverture ne dépasse pas encore une densité de 20 pour cent; d) Les chemins forestiers, les voies d'eau et autres petites clairières, ainsi que les pépinières forestières qui font partie intégrante de la forêt et ne peuvent être facilement exclues par le dispositif de sondage envisagé. Elles ne comprennent pas: a) Les groupes isolés d'arbres de moins de 0,5 ha; b) Les parcs urbains, les jardins privés et les pâturages; c) Les brise-vents et les haies dont la surface est supérieure à 0,5 ha mais qui forment des bandes trop étroites pour faire l'objet d'un aménagement forestier.

	Les étapes de la classification	Définition ou explication
2.	(suite)	Dans les autres superficies boisées on comprend les terres ayant des arbres dont les couronnes couvrent moins de 20 pour cent de la surface ou les terres portant des buissons ou des arbres rabougris sur plus de 20 pour cent de la surface et qui ne sont pas utilisées à des fins non forestières telles que le pâturage des animaux domestiques. On comprend aussi les plantations d'alignement (le long des routes, des canaux, des cours d'eau, etc., converties en superficies en appliquant un coefficient de 0,8 ha par 1 000 m), ainsi que les brise-vents et haies non compris dans les forêts.
3.	Ventiler la superficie forestière en: 1. Peuplements naturels 2. Peuplements artificiels	Pour la distinction entre peuplements naturels et artificiels, suivre la classification du paragraphe 233.
4.	Ventiler les peuplements naturels en: a) Forêts de feuillus (mangrove non comprise) b) Forêts de résineux c) Forêts mixtes et feuillus/résineux d) Bambousaies e) Mangrove f) Palmeraies côtières et riveraines g) Superficies provisoirement déboisées	Classer dans les types (a) ou (b) les peuplements comprenant plus de 80 pour cent de feuillus (ou de résineux) et dans le type (c) les peuplements mixtes contenant moins de 80 pour cent des uns ou des autres. Lorsqu'il y a un sous-étage à bambous dans ces trois classes, on le notera afin d'estimer la superficie de bambousaie mélangée. Il peut s'avérer utile de subdiviser (a) en forêts feuillues hétérogènes et forêts feuillues pures (ou presque pures) dans certaines régions tropicales où il existe des peuplements purs (ou presque purs) de certaines essences de feuillus (cas de Gilbertiodendron dewevrei dans le bassin du Congo). Classer en (a), (b) ou (c), les zones de culture itinérante où la forêt s'est rétablie.
5.	Ventiler les peuplements artificiels comme les peuplements naturels (cf. supra 4).	
6.	Ventiler les autres superficies boisées en: 1. Savanes, forêts claires 2. Landes, forêt rabougrie et forêt arbustive. 3. Plantations d'alignement, brise-vents, haies 4. Autres superficies boisées	On entend par savanes les zones portant des arbres épars et des broussailles sur un tapis herbacé ou graminéen . La densité du couvert peut dépasser 20 pour cent. Les types (2) et (3) sont définis dans 2.
7.	Classer les ''superficies non boisées'' en : 1. Terres agricoles a. Cultures et pâturages améliorés b. Plantations	a) comprend les zones de culture itinérante où la terre est préparée pour la culture ou cultivée ou non encore reboisée. Les plantations comprennent les vergers, les plantations d'hévéas, les palmeraies, etc.

Les étapes de la classification	Définition ou explication
7. (suite)	
2. Autres terres	Rochers, sables, glace, etc.
a. Terres stériles	Prairies, pampas, steppes. S'il y a un étage de végétation ligneuse clairsemée, classer la superficie correspondante dans ''autres superficies boisées''
b. Prairies et parcours naturels	
c. Marécages	Zones marécageuses sans couvert d'arbres.
d. Landes sans arbres	
e. Superficies urbaines, industrielles et voies de communication	Comprend les servitudes de passage pour routes, chemins de fer, lignes à haute tension, etc.
f. Autres superficies	

232 La classification proposée par la FAO est donc la suivante:

Classes actuelles de forêts et d'utilisation des sols

Superficie totale des terres

A. Superficie forestière

1. Peuplements naturels

   a. Forêts de feuillus (mangrove non comprise)
   b. Forêts de résineux
   c. Forêts mixtes feuillus/résineux
   d. Bambousaies
   e. Mangrove
   f. Palmeraies côtières et riveraines
   g. Superficies provisoirement déboisées

2. Peuplements artificiels

(on utilise les subdivisions précédentes de (a) à (g))

B. Autres superficies boisées

1. Savanes, forêts claires
2. Landes, forêts rabougries et forêts arbustives
3. Plantations d'alignement, brise-vents et haies
4. Autres superficies boisées

C. Superficies non boisées

1. Terres agricoles

   a. Cultures et pâturages améliorés
   b. Plantations

2. Autres terres

   a. Terres stériles
   b. Prairies et parcours naturels
   c. Marécages
   d. Landes sans arbres
   e. Superficies urbaines, industrielles et voies de communication
   f. Autres superficies

233 Définition et interprétation de l'expression peuplements forestiers artificiels

Le texte qui suit est extrait d'une note ''Rôle effectif et potentiel des peuplements forestiers artificiels dans l'évolution de la structure mondiale de la consommation de bois'', préparée par le Secrétariat du ''Colloque mondial sur les peuplements artificiels et leur importance industrielle'' (Canberra, 14-25 avril 1967).

''L'expression semble assez simple, mais la définition a soulevé des difficultés, et elle a donné lieu à diverses interprétations. En fait, certaines des distinctions naturelles entre les catégories sont floues, et un essai de définition plus ou moins arbitraire s'impose. Pour avoir une définition finale et sûre, il faut attendre les résultats du projet relatif à la terminologie multilingue en matière de foresterie, qui est exécuté sous la direction du Comité FAO/IUFRO de la bibliographie et de la terminologie, et avec le concours du Service des forêts des Etats-Unis, du Département des forêts du Canada, et de la Société des forestiers américains. En attendant, on peut se référer, dans une certaine mesure, aux définitions adoptées par le groupe de travail du boisement et du reboisement de la Commission européenne des forêts (1953), à sa deuxième session, telles qu'elle les a amendées à sa troisième session (1954), ainsi qu'aux répertoires déjà parus, comme le British Commonwealth forest terminology, Part I, et la Forestry terminology de la Société des forestiers américains.

Le plus simple, semble-t-il, est d'appliquer à la forêt artificielle la définition que donne d'une plantation le British Commonwealth forest terminology: ''Une culture forestière artificielle, reproduite par semis ou par plantations.'' On pourrait en déduire que cette définition englobe toutes les formes de régénération artificielle, mais non la régénération naturelle. ''Régénérer'', c'est normalement ''recréer'', ce qui implique le renouvellement de quelque chose de préexistant, plutôt que son remplacement par quelque chose de différent. En ce sens, on peut dire qu'une forêt constituée par régénération artificielle est recréée plutôt que créée par

Il existe différents types de peuplements, naturels ou artificiels, obtenus de diverses façons:

1. Boisement. Forêts établies artificiellement par boisement sur une terre qui ne portait pas auparavant de couvert forestier. C'est là l'exemple le plus clair de forêt artificielle et qui comporte toujours une extension de la forêt. Il faut aussi bien définir la durée pendant laquelle la terre n'a pas porté de couvert forestier. L'expression ''de mémoire d'homme'' peut s'appliquer à des régions pour lesquelles on ne dispose pas de statistiques, mais pour les autres on suggère d'adopter l'expression ''depuis 50 ans''.

2. Reboisement. Forêts établies artificiellement par reboisement sur des terres qui ont porté un couvert forestier dans les cinquante années précédentes ou de mémoire d'homme, l'opération comportant le remplacement de la culture antérieure par une culture nouvelle et fondamentalement différente. Le changement le plus fréquent a trait à la conversion des espèces, mais il peut consister aussi à employer des semences reconnues comme génétiquement différentes de la culture antérieure, c'est-à-dire des semences provenant de vergers à graines, consistant en génotypes de qualité supérieure démontrée par des tests de descendance. Dans la mesure où la forêt établie artificiellement par l'homme est fondamentalement différente de celle qui la précédait, c'est là aussi un parfait exemple de forêt artificielle, bien qu'il n'y ait pas augmentation de la surface forestière. On suggère de réserver le vocable de ''reboisement'' à cette opération pour la distinguer de celles qui sont décrites ci-après.

3. Régénération artificielle. Forêts établies par régénération artificielle sur des terres ayant porté des forêts au cours des 50 années précédentes ou de mémoire d'homme, et comportant le renouvellement d'une culture fondamentalement semblable à la précédente. Dans la mesure où il en va ainsi, il s'agit d'une forêt recréée plutôt que créée par l'

4. Régénération naturelle. Forêts créées par régénération naturelle avec l'aide délibérée des sylviculteurs. Dans le passé, cette aide a parfois coûté davantage en temps, en efforts et en argent que certaines des formes de régénération artificielle. Néanmoins, dans la mesure où la source de semences ou de reproduction végétative est naturelle, il semble logique de parler en l'espèce d'une forêt naturelle (mais bénéficiant de l'effort humain).

5. Régénération naturelle. Forêts établies par régénération naturelle sans aide délibérée de l'homme. La définition inclurait les forêts dites ''forêts vierges'', ainsi que celles qui sont régénérées par des moyens entièrement naturels. Ce sont là des exemples les plus clairs de forêt naturelle.

La définition figurant dans le questionnaire de la FAO distribué en 1966 répondait au souci de distinguer entre les catégories 2 et 3 susmentionnées, de façon à inclure dans les forêts artificielles toutes celles qui comportaient la création de quelque chose de fondamentalement nouveau, mais à exclure celles qui sont formées par renouvellement du même type de forêt. C'était là, semble-t-il, une distinction logique, conforme à celle qu'opérait le groupe de travail du boisement et de reboisement de la Commission européenne des forêts, lorsqu'il a défini la régénération artificielle comme ''la reconstitution de l'état boisé par plantation ou semis, dans le cadre de la gestion normale et le reboisement comme la reconstitution de l'état boisé par plantation ou semis, lorsque cette reconstitution n'a pu s'effectuer dans le cadre de la gestion normale''. Toutefois, certaines difficultés d'interprétation ont surgi. Dans des cas limites, il peut être difficile de déterminer si la composition spécifique de nouvelles forêts est ou n'est pas fondamentalement la même que celle de la culture précédente, ou bien encore si les méthodes de gestion utilisées sont normales ou non. Il paraît donc préférable de distinguer entre les catégories 3 et 4 et d'inclure et de grouper toutes les formes de régénération artificielle. Cela correspond exactement à la définition simple que propose actuellement la British Commonwealth forestry terminology pour la plantation: ''Culture forestière constituée artificiellement par plantation ou semis.''

Systèmes de régénération mixte

On rencontre des difficultés quand dans la même zone il y a régénération naturelle et régénération artificielle. Dans ce cas, on propose que le critère déterminant soit la composition recherchée de la culture finale. Si celle-ci a été régénérée artificiellement à plus de 50 pour cent, il faut considérer la forêt comme artificielle.

Conformation

Le mot ''forêt'' implique que le peuplement a une certaine largeur, et il peut difficilement s'appliquer à des plantations en ligne. De même, l'expression ''cultures forestières'' implique qu'une forte proportion des arbres croissent en concurrence à l'intérieur de la ''culture'' plutôt qu'ils ne rivalisent avec d'autres formes de végétation extérieures à la culture, et ils peuvent donc constituer un véritable milieu forestier. Les plantations en ligne, les plantations routières, etc., où nombre d'arbres sont soumis à des influences ''marginales'' ne répondent pas à cette description. Bien qu'il s'agisse incontestablement de peuplements artificiels, ce ne sont pas des forêts au sens strict du terme. En revanche, les rideaux-abris d'un kilomètre de large environ, tels la ''ceinture verte'' de Khartoum, sont de véritables forêts. On estime que la forêt doit avoir au minimum 100 mètres de largeur. Dans la pratique, étant donné l'importance des plantations en ligne et des rideaux-abris dans de nombreux pays, il importe de les étudier en même temps que des formes plus orthodoxes de peuplements forestiers artificiels, comme cela est le cas au cours du présent colloque, mais en les mentionnant explicitement. Il convient de noter que le groupe de travail du boisement et du reboisement de la Commission européenne des forêts a défini les ''plantations hors forêts'' comme étant des ''plantations en ligne'' (plantations routières, brise-vent, etc.) et plantations en massifs associées à un revenu permanent agricole sur le même terrain.

Densité

Le mot ''forêt'' implique un étage dominant fermé, du moins quand les arbres sont assez âgés pour en former un, et donc un minimum de densité du peuplement. Il convient d'être très précis à cet égard, pour éviter le gonflement trompeur des chiffres touchant les superficies ''boisées'', du fait de l'inclusion de '' plantations'' peuplées seulement à 10 pour cent, et ne pouvant guère profiter des qualités productives du terrain. On propose que pour les jeunes cultures non encore éclaircies, un ''peuplement complet'' comporte au minimum 1 000 individus à l'hectare, ou 75 pour cent des arbres plantés, en appliquant le chiffre le moins élevé, pour une répartition assez uniforme. Les jeunes peuplements où le taux de survie est de 25 à 75 pour cent, soit 300 à 1 000 individus à l'hectare, doivent être considérés comme des ''peuplements partiels'', et ceux où le taux de survie est inférieur à 25 pour cent, soit moins de 300 arbres à l'hectare, comme ''peu peuplés''. Dans bien des cas, il faut songer à éliminer cette dernière plantation, et à la replanter en totalité.

Naturalisation

Les plantations d'essences exotiques sont, ipso facto, artificielles au cours de la première révolution. Si au cours des révolutions suivantes la plantation est régénérée naturellement, on peut se demander si les forêts ainsi constituées peuvent être dénommées naturelles du fait de leurs méthodes de régénération, ou artificielle, car elles n'auraient jamais pu exister si l'homme n'était pas intervenu activement au début du processus. Dans certains cas, il faut recourir à une définition purement arbitraire; on suggère de considérer les cultures d'essences exotiques régénérées naturellement comme des forêts ''artificielles'' jusqu'à 250 ans à partir de la date de leur introduction initiale dans la région, mais au-delà de cette durée, de considérer qu'elles sont naturalisées.

Cultures agricoles et cultures forestières

La logique de la distinction opérée entre cultures arbustives agricoles et cultures arbustives forestières est souvent obscure. Par exemple, on ne voit pas très bien pourquoi les plantations d'hévéas sont considérées comme cultures agricoles, alors que les plantations d'acacias à écorce à tannin sont classées comme cultures forestières. Il est vain de vouloir modifier des distinctions qui sont maintenant généralement acceptées par la tradition, mais les pays doivent respecter les mêmes distinctions, qu'il s'agisse des essences figurant dans les forêts artificielles dont la superficie est indiquée, ou de celles qui en sont exclues comme étant des ''cultures agricoles'', ou du moins ils doivent connaître les différences. Par exemple, la Côte-d'Ivoire a inclus plus de 5 000 hectares d'Anacardium dans ses forêts artificielles, alors que d'autres pays peuvent considérer qu'il s'agit là d'une culture agricole.

3 Interprétation des photographies aériennes classiques en inventaire forestier

31 Introduction

311 Estimation des surfaces avec, ou sans, cartographie forestière. L'utilisation de toutes les classifications du paragraphe 21, revient à ventiler la superficie en une série de subdivisions ou strates. Un des objectifs de l'inventaire forestier est d'obtenir de bonnes estimations de ces surfaces (ou de la proportion de ces surfaces dans la surface totale). Un autre objectif est souvent de situer ces surfaces sur une carte.

312 Classifications ''obligatoires'' et classifications conçues pour l'inventaire. Les classifications ci-dessus se répartissent en deux catégories:

a) Certaines classifications sont données a priori et ne peuvent être ignorées ou modifiées par l'inventoriste. Il en est ainsi, par exemple des classifications fondées sur le régime de propriété ou administratif. L'estimation et la cartographie des surfaces correspondantes aux différentes classes ne nécessitent en général pas de photointerprétation: il

suffit de reporter l'information obtenue à partir des documents disponibles (tels que les lois créant les réserves forestières, les contrats de concession, etc.) sur les cartes topographiques (ou planimétriques) et de mesurer ensuite les surfaces sur ces cartes. On peut parfois utiliser les photographies aériennes pour compléter les cartes (caractéristiques planimétriques ou topographiques telles que petites rivières, crête d'une chaîne de collines, etc.).

b) D'autres classifications sont élaborées en totalité ou en partie par le responsable de l'inventaire, comme celles qui reposent sur l'occupation actuelle des sols, sur l'accessibilité, sur les ''classes de condition''. Mais l'inventoriste devrait essayer, dans la mesure du possible, de faire coïncider ses classifications avec celles qui sont déjà établies et reconnues, afin de permettre une comparaison et une fusion avec les résultats d'inventaires réalisés par d'autres forestiers. C'est malheureusement très rarement le cas et trop souvent on adopte des classifications particulières, indépendantes des classifications existantes. Si celles-ci sont insuffisantes, on devrait d'abord essayer de les améliorer ou de les affiner afin que les classes (ou groupes de classes) de la nouvelle classification soient compatibles avec les anciennes. C'est seulement lorsque cet essai s'avère infructueux qu'il y a lieu d'établir une nouvelle classification.

L'estimation et la délimitation des superficies correspondant à ces classifications se font, en général, par photointerprétation.

32 Remarques sur les photographies et les couvertures aériennes

(De nombreux livres et manuels existent sur la photographie aérienne et sur la photo-interprétation. Quelques-uns sont cités en bibliographie et on ne cherchera pas ici à reprendre ou même à résumer l'ensemble de cette documentation; on se bornera à signaler les éléments pouvant intéresser les responsables d'inventaire qui utilisent la photographie aérienne conventionnelle.

321 Caractéristiques des photographies aériennes

321.1 Echelle

321.11 Définition

L'échelle est le rapport entre une longueur sur la photographie et la distance correspondante au sol. Elle est exprimée sous la forme d'une fraction (1/25 000) ou d'un rapport (1:25 000): 1 cm sur la photographie aérienne équivaut à 25 000 cm = 250 m au sol.

Elle est égale au rapport: $\frac{\text{distance focale de l'appareil photographique}}{\text{altitude de l'appareil photographique au-dessus du sol}} = \frac{f}{H}$

H est la distance entre la lentille de l'appareil et sa projection verticale au sol.

Si le terrain n'est pas parfaitement plat l'échelle n'est pas la même sur toute la photographie. Cette distorsion est d'autant plus importante que l'échelle est grande (altitude moyenne assez faible) et que le terrain est montagneux (différences significatives entre les altitudes des divers points du terrain).

321.12 Echelles utilisables en inventaire forestier (échelles recommandées pour les inventaires forestiers)

On peut classer comme suit les échelles des photographies aériennes:

1/200 à 1/3 000	photographies aériennes à très grande échelle
1/3 000 à 1/10 000	photographies aériennes à grande échelle
1/10 000 à 1/25 000	photographies aériennes à moyenne échelle
1/25 000 et moins	photographies aériennes à petite échelle

Les photographies aériennes à grande ou très grande échelle sont utilisées dans les inventaires forestiers dans lesquels des paramètres du peuplement sont estimés essentiellement par des mesures sur les photographies (photogrammétrie). Il en est ainsi pour certaines forêts tempérées ayant un nombre limité d'essences, où les paramètres mesurés sont la hauteur des arbres dominants et co-dominants, la densité du couvert, le diamètre des couronnes, etc. L'un des problèmes à résoudre est l'estimation précise de la hauteur de l'appareil photographique au-dessus du sol (qui est à son tour utile pour estimer précisément l'échelle des photographies).

Les petites et moyennes échelles ne sont en général utilisées que pour la stratification, la cartographie et l'estimation des surfaces forestières considérées dans des inventaires forestiers où tous, ou presque tous les paramètres sont estimés sur le terrain. L'échelle utilisée dans un inventaire forestier dépend de la finesse de la stratification à effectuer et des critères utilisés pour cette stratification. Si par exemple on doit identifier des essences, on aura sans doute besoin d'une échelle moyenne. Mais si la stratification n'implique pas la distinction des essences, une petite échelle peut être suffisante. C'est assez souvent le cas dans les forêts tropicales hétérogènes pour lesquelles l'identification des essences n'est en général pas possible actuellement, tout au moins à des échelles inférieures au 1/10 000, et n'est donc pas utilisée comme critère de stratification.

Dans de nombreux pays tropicaux, les seules photographies disponibles sont à petite échelle car les missions aériennes ont eu pour objectif prioritaire d'établir des cartes topographiques dont l'échelle ne dépasse en général pas le 1/50 000.

Le tableau ci-dessous est une récapitulation synoptique des échelles de photographies aériennes utilisées en inventaire forestier:

Type	Echelle	Utilisation
Très grande échelle Grande échelle	1/200 - 1/3 000 1/3 000 - 1/10 000	Mesures photogrammétriques (estimation des paramètres des peuplements) ou stratifications fines fondées sur des critères mesurés quantitativement
Echelle moyenne	1/10 000 - 1/25 000	Stratification moins précise fondée sur des critères qualitatifs tels que la présence d'espèces déterminées ou sur des critères quantitatifs estimés (tels que la densité des couronnes ou la hauteur des arbres dominants)
Petite échelle	< 1/25 000	Stratification en grands types fondée sur des critères qualitatifs, mais généralement sans identification des essences), et sur des critères quantitatifs grossiers.

321.2 Type d'émulsion

Les photographies aériennes conventionnelles donnent l'image de la réflexion par les objets des radiations électromagnétiques du spectre visible (0,4 μ - 0,8 μ) et parfois des radiations du proche infrarouge (jusqu'à 1 μ). Dans ce dernier cas, les photographies sont dites photographies infrarouges.

321.21 Photographies conventionnelles sans proche infrarouge

Les photographies panchromatiques noir et blanc sont les plus courantes et les plus utilisées actuellement. La plupart des missions aériennes extensives en vue d'une cartographie

topographique utilisent des films panchromatiques qui sont en fait ceux auxquels les gens sont le plus habitués. La sensibilité spectrale de la plupart des films panchromatiques aériens varie entre 0,36 et 0,72 μ . On les utilise, en général, avec un filtre jaune qui élimine les radiations en-dessous de 0,5 μ . Leur pouvoir de résolution (en lignes par mm enregistrées par le film), leur vitesse et leur grain varient énormément d'un film à l'autre.

Les émulsions couleurs sont bien moins courantees et elles sont utilisées, en général, pour des buts bien précis et pour des zones limitées. Les missions couleur sont un peu plus chères seulement que les missions panchromatiques correspondantes. On dit que ''l'oeil humain peut distinguer 100 fois plus de combinaisons de couleurs (teintes, tons et chromas) que de teintes de gris (un rapport de 20 000 à 200)''. L'identification des essences aussi bien que la détection des peuplements malades se fait plus facilement sur des photographies aériennes en couleur que sur des photographies panchromatiques, et cela permet en général une stratification plus fine.

321.22 Emulsions ''infra-rouge''

La sensibilité des films noir et blanc infrarouge s'étend jusqu'à 0,9 ou 1,0 μ. Les filtres absorbent en général les rayons bleus et bleus-verts de telle sorte que la sensibilité s'étend approximativement de 0,6 à 0,9 μ. Pour l'interprétation forestière, les principaux avantages de l'infrarouge sur les émulsions noir et blanc sont les suivants:

- plus de facilité à distinguer les angiospermes (feuillus) des gymnospermes (conifères) sur les photographies infra-rouges;

- possibilité de distinguer les arbres feuillus malades des sujets sains;

- différenciation facile entre l'eau et la terre ferme, et d'autre part, entre les terres humides et sèches. Cela est particulièrement utile pour la délimitation entre les forêts sur sols secs et forêt de marécages;

- meilleure individualisation des arbres. Il est donc plus facile de délimiter les peuplements que sur les photographies panchromatiques. Cela est surtout vrai pour les grandes échelles.

Les émulsions ''infrarouge couleur'' (émulsions ''fausse couleur'' ou film ''spectrozonal'' russe) permettent la reproduction, en couleur, de la même bande spectrale que les films noir et blanc infrarouge. Elles réunissent les avantages de la reproduction en couleur (nombre important de combinaisons de teintes, de tons et de chromas et de la sensibilité au proche infra-rouge (détection de l'humidité et des stress de la végétation). L'identification des essences, et une stratification plus fine fondée sur l'humidité des sols, la composition et la santé des peuplements sont plus faciles avec ce fils qu'avec les trois précédents.

La multiprojection permet de réaliser un nombre plus important de différentes photographies fausse couleur à partir d'une même série de photographies dans des bandes séparées (voir le paragraphe 613 de ce chapitre).

321.3 Le développement

Les épreuves (sur papiers opaques ou transparents) sont obtenues à partir de négatifs par contact ou à l'aide d'appareils de développement automatiques. Ce deuxième système est plus économique et ''il a l'avantage de traduire sur une même épreuve toute la gamme de densités existant sur le négatif'' 1/. Les ''épreuves brillantes très contrastées ont l'avantage d'avoir une gamme de densité plus importante. Les épreuves mates, elles, permettent une écriture plus facile et, d'autre part, les reflets sont moins fatigants pour les yeux. On préfère, actuellement, un papier mi-mat ou mi-brillant ou brillant-mat qui est intermédiaire

1/ d'après J.A. Howard, ''Aerial photo-ecology'', pages 36-37.

entre les deux''1/. Les épreuves aériennes sont sujettes à de nombreux défauts et il faut y penser quand on établit des contrats de missions aériennes afin de les éviter autant que possible. Ces défauts sont donnés dans le livre cité en 1/, ce sont: zones floues, empreintes digitales, lignes d'abrasions, rayures, poches d'air, stries, points clairs ou sombres irréguliers, contrastes insuffisants ou excessifs (voir plus bas), densité insuffisante ou excessive, boursouflures, taches brunes, taches jaunes, teintes passées, images dédoublées, marques de séchage, marques allongées correspondant à une pression irrégulière, dessins en fourchette ou en doigt, stries sombres, petites zones circulaires surexposées.

321.4 Principaux critères de qualité de l'image

L'interprétation des photographies aériennes dépend de l'habileté de l'interprétateur, des appareils utilisés et, bien sûr, de la qualité des photographies. On peut évaluer la qualité des photographies d'après les trois critères suivants:

- contraste de ton (ou de couleurs dans le cas de photographies couleur) que l'on peut définir par la différence réelle de ton photographique ou de brillance entre un facteur spécifique à interpréter et le fond sur lequel il se trouve;

- la ''netteté'' avec laquelle une différence apparaît sur la photographie: plus la photographie sera nette, plus l'interprétation sera facile;

- la ''parallaxe stéréoscopique'' est la différence de la position apparente d'un élément - tel que le sommet d'un arbre - par rapport à celle d'un autre - tel que la base de cet arbre - résultant d'un décalage du point d'observation. On la mesure à l'aide de la différence de parallaxe Dp dont le rapport avec la différence d'altitude, h, entre ces deux éléments s'exprime par la formule:

$$h = \frac{H \times Dp}{P}$$

où H est la hauteur de l'objectif au-dessus du sol et P est la distance horizontale entre les deux points d'observation; Dp est la somme des projections des distances entre ces deux éléments, prises parallèlement à la ligne de vol sur chaque photographie. On utilise cette formule en photogrammétrie pour mesurer sur les photographies des éléments tels que la hauteur d'un arbre. Un appareil de mesure basé sur cette formule est la barre de parallaxe, un autre, plus simple, est la règle de parallaxe.

322 Caractéristiques des couvertures aériennes

322.1 Recouvrements

Le long d'une même ligne de vol, les surfaces couvertes par deux photographies successives se chevauchent. Le recouvrement peut être exprimé par le pourcentage de la surface couverte par une photographie: on l'appelle alors recouvrement longitudinal. Le recouvrement latéral correspond au chevauchement des photographies de deux vols adjacents et parallèles.

Le recouvrement longitudinal est en général de l'ordre de 55 à 65 pour cent alors que le recouvrement latéral varie de 10 à 40 pour cent ou même plus. Les deux sont nécessaires à une bonne interprétation stéréoscopique et à la restitution cartographique.

Le nombre N de photographies correspondant à la couverture aérienne d'une surface donnée S est approximativement égal à:

$$N = \frac{S \times e^2}{l^2 (1-R1)(1-R_2)}$$

1/ d'après J.A. Howard, ''Aerial photo-ecology'', pages 36-37.

où e est l'échelle moyenne de la couverture

l est le côté d'une photographie aérienne

R_1 est la recouvrement longitudinal (en général: $0,55 \leqslant R_1 \leqslant 0,65$)

R_2 est le recouvrement latéral (en général: $R_2 \geqslant 0,10$)

(si S est exprimée en ha, l doit être donné en hm)

Supposons, par exemple, que l'on ait:

S - 1 000 000 ha

$e = \frac{1}{20\ 000}$

l = 23 cm = 0,0023 hm (9 inches)

R_1 = 0,60

R_2 = 0,20

On aura alors:

$$N = 1\ 000\ 000 \times \left(\frac{1}{20\ 000}\right)^2 \times \frac{1}{(0,0023)^2 \times 0,40 \times 0,80} \approx 1\ 500$$

On peut construire des graphiques permettant d'obtenir N pour une échelle donnée en admettant que le recouvrement et le format des photographies sont déterminés.

Du fait des variations significatives d'échelle dans les régions montagneuses, il est préférable de demander un plus fort pourcentage de recouvrement longitudinal (jusqu'à 80 pour cent) et latéral (jusqu'à 40 pour cent).

322.2 Lignes de vol

Les lignes de vol devraient être théoriquement équidistantes et parallèles entre elles. Du fait de plusieurs facteurs tels que le vol en crabe, la dérive, la déclinaison et l'inclinaison de l'appareil, les recouvrements ne seront pas constants.

Les tableaux d'assemblage sur feuilles transparentes, sur lesquels on trace les lignes de vol avec l'indication des centres des photographies successives, sont très utiles et doivent être exigés dans tout contrat de couverture aérienne.

322.3 Inclinaison et sa rectification

L'inclinaison et la déclinaison de l'avion se traduisent par une inclinaison égale de l'axe de l'appareil photographique par rapport à la verticale. Le plan de la photographie n'est alors pas parfaitement horizontal. On peut corriger ces photographies inclinées en les projetant obliquement sur un plan horizontal de référence, l'angle entre le plan photographique et l'horizontale étant déterminé à partir de la reconnaissance au sol ou d'après les documents de vol.

322.4 Autres spécifications

L'annexe I donne d'autres précisions sur les missions aériennes, telles que la jonction des bandes (importante lorsque le survol aérien est fait en plusieurs fois ou lorsqu'on doit l'utiliser avec d'autres missions couvrant des régions voisines), la couverture nuageuse (qui doit être inférieure à un certain pourcentage) et l'heure du jour - les ombres ne devant pas réduire la valeur des photographies pour l'interprétation.

323 Quelques problèmes des missions photographiques aériennes. Pour de nombreux inventaires forestiers, il convient d'effectuer de nouvelles prises de vue aériennes soit parce que celles qui existent sont incomplètes ou ne couvrent pas la zone à inventorier soit parce qu'elles sont trop anciennes (dans le cas où l'occupation des sols aurait beaucoup changé depuis la dernière couverture) soit parce qu'elles n'ont pas l'échelle ou les caractéristiques désirées. Si les moyens financiers sont disponibles et si le plan d'inventaire implique l'utilisation des photographies aériennes, une couverture photographique doit être prévue.

Outre les spécifications techniques figurant à l'annexe I, d'autres points doivent être pris en considération lors de la préparation d'un contrat de prises de vues aériennes.

a) Restrictions gouvernementales

Dans de nombreux pays, les prises de vues aériennes sont limitées par l'Etat. Il faut vérifier si la prospection aérienne est autorisée sur la zone à inventorier (en particulier par des firmes étrangères), si les clichés peuvent être développés à l'étranger (lorsque les moyens techniques de développement ne sont pas suffisants sur place), etc.

b) Renseignements préliminaires à recueillir:

Avant de lancer un appel d'offres, on doit rassembler des renseignements sur les points suivants:

- la saison de vol, le nombre de jours où la photographie sera possible et les données météorologiques générales;
- la topographie, le terrain et l'altitude des zones à photographier;
- les documents disponibles (cartes) et les données au sol;
- l'emplacement des aérodromes offrant les services nécessaires;
- les permis exigés, etc.

c) Coût et paiement:

Le coût d'une mission photographique aérienne n'est pas évalué uniquement d'après la surface de la zone à inventorier et d'après l'échelle et les caractéristiques des photographies. La mise en place (mobilisation et démobilisation) et l'attente peuvent être très importantes, surtout dans les pays tropicaux où la couverture nuageuse est souvent un handicap sérieux. La rémunération peut être calculée sur la base des seules photographies, des photographies et de la mise en place, des photographies, de la mise en place et de l'attente, des photographies, de la mise en place, de l'attente et des heures de vol ou suivant d'autres formules. Il faut évaluer les différents facteurs, quand les offres sont reçues, afin d'assurer que le prix sera raisonnable.

L'exemple ci-après montre la gamme des prix pour chaque poste, selon l'importance relative que leur attachent les soumissionnaires. Cet exemple est tiré d'une couverture à réaliser avec différentes échelles, sur une surface de 5 000 km2 dans un pays tropical (1972).

		Offres (en $ E.-U.)
1.	Mobilisation	1 200 à 6 150
2.	Démobilisation	1 200 à 6 150
	Total partiel (mise en place)	2 400 à 12 300
3.	Prix par km2 pour des photographies panchromatiques au 1/15 000	4,73 à 7,98
4.	Prix par km2 pour des photographies infra-rouges au 1/30 000	3,42 à 6,77
5.	Prix par km2 pour des photographies panchromatiques au 1/5 000	24,47 à 37,31
6.	Prix par km2 pour le tirage mi-mat des épreuves par contact de la couverture 3 ci-dessus	
	a) première série	0,17 à 0,75
	b) deuxième série	0,13 à 0,35
	c) 4 séries suivantes	0,13 à 0,30
7.	Prix par km2 pour le tirage mi-mat des épreuves par contact de la couverture 4 ci-dessus	
	a) première série	0,09 à 0,26
	b) deuxième série	0,07 à 0,15
	c) 4 séries suivantes	0,05 à 0,15
8.	Prix par km2 pour le tirage mi-mat des épreuves par contact de la couverture 5 ci-dessus	
	a) première série	3,00 à 5,71
	b) deuxième série	1,60 à 3,00
	c) 4 séries suivantes	1,53 à 3,00
9.	Coût des tableaux d'assemblage de la couverture 3 (indication des légendes sur les cartes topographiques existantes au 1/50 000)	0,10 à 26,64
10.	Coût des tableaux d'assemblage de la couverture 4	0,10 à 1,21
11.	Coût des tableaux d'assemblage de la couverture 5	1,50 à 61,35
12.	Prix, par km2, pour la réalisation d'une mosaïque non contrôlée au 1/15 000 d'après la couverture 3, avec une diapositive de chaque série	1,41 à 3,66

324 Mosaïques. Il est parfois utile d'utiliser un assemblage de photographies aériennes afin d'avoir une image claire de la zone inventoriée ou de certaines parties de cette zone. Cet assemblage peut être formé d'épreuves non corrigées, dont les détails sont juxtaposés d'une épreuve à l'autre sans vérification au sol ou autre système d'orientation. La mosaïque est alors dite non contrôlée. Une mosaïque contrôlée est formée d'épreuves qui ont été corrigées et proportionnées (afin que toutes les photographies aient la même échelle moyenne). Les mosaïques semi-contrôlées sont formées de photographies corrigées assemblées suivant une base d'orientation commune autre que la vérification sur le terrain.

Les mosaïques contrôlées ne sont pas encore comparables à une carte car les variations dues aux aberrations des objectifs et à la topographie n'y sont pas corrigées. Les mosaïques complètement corrigées sont dites orthophotomosaïques ou ''orthophotoplans'' (voir paragraphie 614 ci-dessous). Cependant, en terrain plat ou légèrement ondulé on peut utiliser des mosaïques contrôlées en guise de cartes planimétriques.

33 Photointerprétation

La photointerprétation en inventaire forestier consiste à identifier et éventuellement délimiter sur les photographies aériennes les classes correspondant à la classification adoptée.

Certaines classes sont relativement faciles à définir et à délimiter à l'intérieur de la zone inventoriée parce qu'elles coïncident avec des limites géographiques, par exemple celles qui correspondent aux régimes de propriété, au système administratif et à la topographie. La partie la plus importante et la plus intéressante de la photointerprétation en inventaire forestier concerne l'identification (et éventuellement la délimitation) des différentes classes d'utilisation des sols, de végétation, de types forestiers et d'accessibilité.

331 Qualités d'une bonne photointerprétation. Une bonne photointerprétation doit être aussi objective que possible. Bien que l'analyse des photographies aériennes se fasse par une observation et une interprétation directe par l'homme, elle doit toujours être fondée sur une série de critères et de définitions précis ou clefs; cela s'impose pour les deux raisons principales suivantes:

- la photointerprétation doit être aussi homogène que possible dans le temps, depuis le début jusqu'à la fin des travaux; ces clefs servent donc de référence permanente pour l'interprétateur;

- la photointerprétation doit être aussi constante que possible quelque soit l'interprétateur et les clefs servent à réduire les différences. Ces clefs servent aussi de guide aux équipes de terrain, pour la reconnaissance au sol des différentes classes de photointerprétation et elles facilitent, ainsi, la concordance entre les classifications établies par photointerprétation et celles établies sur le terrain.

Les critères de classification utilisés en photointerprétation doivent être facilement repérables sur le terrain afin de pouvoir servir dans les travaux au sol. Ainsi, les classifications fondées sur les paramètres photographiques tels que le couvert, la hauteur des arbres dominants, l'humidité du sol et les facteurs topographiques doivent être claires et compréhensibles pour le personnel de terrain, sinon elles seront inutiles pour l'inventaire. Dans de nombreux inventaires, les travaux de photointerprétation et ceux de terrain sont menés indépendamment, de sorte que les travaux de photointerprétation réalisés en vue d'une cartographie forestière n'aident pas à réduire l'erreur d'échantillonnage de l'inventaire; inversement, ces résultats ne peuvent pas être utilisés pour caractériser les classes forestières délimitées sur les cartes. Il peut arriver que des variations du couvert forestier intervenues après la prise de vues ou que des erreurs de photointerprétation introduisent des différences entre les résultats obtenus par photointerprétation et ceux obtenus sur le terrain. Ces différences peuvent être prises en considération dans le dispositif d'inventaire (chapitre VII) à condition que la classification en types de forêt soit essentiellement la même pour les travaux de photointerprétation et sur le terrain.

A cause de cette exigence d'objectivité et parce qu'elles doivent pouvoir être utilisées sur le terrain, les classifications de photointerprétation ne doivent pas être trop fines, faute de quoi les risques d'erreur et de variation dans le temps, de divergences entre interprètes, et de différence avec les observations sur le terrain, augmentent et les résultats sont moins bons.

332 Interprétation stéréoscopique. Les photographies aériennes verticales doivent toujours être interprétées par stéréoscopie afin de percevoir le relief, ce qui, selon de nombreux spécialistes, est une des composantes les plus efficaces de la photointerprétation. L'observation de photographies simples et de mosaïques peut, bien sûr, fournir des renseignements utiles, mais à un moindre degré.

On peut classer les stéréoscopes en trois catégories: stéréoscopes de poche, stéréoscopes à miroirs et autres stéréoscopes à usages particuliers.

Les stéréoscopes de poche sont de petits instruments à lentilles grossissantes (de 2 à 4 fois) séparées par une distance égale à l'espacement des yeux. Ils peuvent être utilisés facilement sur le terrain mais leur emploi est limité du fait de leur faible grossissement, de l'impossibilité de voir toute la surface stéréoscopique dans le sens de la ligne de vol sans avoir à soulever un bord de la photographie, et de l'impossibilité de voir toute la surface perpendiculairement à la ligne de vol sans déplacer le stéréoscope ou les photographies.

Les stéréoscopes à miroir utilisent une combinaison de prismes, de miroirs et de lentilles, ce qui permet d'éviter les inconvénients des stéréoscopes de poche. Ce sont les instruments de base de la photointerprétation au bureau. Différents types de dispositifs permettent d'examiner toute la zone avec un fort grossissement, soit en déplaçant la plaque sur laquelle sont posées les photographies, soit en déplaçant tout le système optique ou simplement les miroirs (stéréoscope ''Old Delft'').

Un stéréoscope particulier a été conçu pour permettre la vision stéréoscopique de plusieurs photographies successives d'une même ligne de vol; un autre, spécialement conçu pour la formation, permet la vision simultanée d'une même photographie par deux interprètes.

333 Elaboration des clefs de photointerprétation. La préparation des clefs de la photointerprétation doit toujours être considérée comme une partie importante de la photointerprétation et il faut y consacrer un temps suffisant. Comme il est capital que la classification établie par photointerprétation soit facilement utilisable sur le terrain, il faut faire de nombreuses vérifications au sol sur la végétation et les essences forestières. Une clef doit toujours être complétée par une série de stéréogrammes témoins. Si la densité du couvert est un des critères de la stratification, on peut utiliser les échelles de ''densité'' qui illustrent divers pourcentages de couvert.

334 Photointerprétation par points photo et photointerprétation avec délimitation

334.1 Introduction

Dans un inventaire forestier à grande échelle, la cartographie forestière peut ne pas être l'un des objectifs de l'opération. Il suffit parfois d'estimer les surfaces des différentes classes de forêt par un échantillonnage de placeaux, sans les délimiter sur les photographies ni reporter ces limites sur des cartes topographiques ou planimétriques.

La photointerprétation par points photo est en général meilleure que la photointerprétation avec délimitation. Il est d'ailleurs souvent difficile de tracer une limite exacte entre les classes. On ne peut éviter une certaine subjectivité et il existe toujours des zones de transition entre les types végétaux ou forestiers. La photointerprétation par points photo est moins subjective. L'estimation des surfaces d'un même type forestier par le même interprétateur peut être sensiblement différent suivant qu'il utilise l'une ou l'autre méthode et cette différence n'est pas uniquement due au fait du sondage utilisé dans la photointerprétation par points photo. Il est souvent préférable d'accepter une erreur d'échantillonnage connue d'après des données de base sûres (photointerprétation par points photo) plutôt que d'évaluer des surfaces sans erreur d'échantillonnage mais avec des biais subjectifs inconnus (photointerprétation avec délimitation).

334.2 Photointerprétation par points photo

- Dans la photointerprétation sans délimitation on utilise des placeaux (''points photo'') de même taille, plutôt que des points proprement dits, afin que l'étude de la végétation ou du type forestier porte toujours sur une même surface de référence. (En photointerprétation avec délimitation, l'évaluation des surfaces des différentes classes peut se faire par comptage des points sur les photographies, ou sur les cartes, une fois que la restitution à partir des photographies a été faite). Les placeaux sont, en général, circulaires avec un rayon de deux ou plusieurs millimètres sur la photographie. Ils sont souvent imprimés sur un support transparent stable que l'on place sur chaque photographie. Si la couverture aérienne a plusieurs échelles, il vaut mieux garder des placeaux de même taille au sol: ainsi, la surface des cercles imprimés sur le calque variera en fonction de l'échelle.

Un placeau est affecté à une classe donnée si plus de 50 pour cent de sa surface appartient à cette classe. Le paramètre correspondant à cette classe prend la valeur 1 si le placeau appartient à la classe, sinon il prend la valeur 0. On estime la proportion de la superficie couverte par une classe de photointerprétation donnée et l'erreur standard avec les formules données au paragraphe 53 ci-dessous.

- Plan d'échantillonnage

L'échantillonnage des placeaux à interpréter doit se faire, en principe, sur une carte ou une mosaïque et les placeaux sont ensuite reportés sur les photographies. Ce choix peut se faire par tirage aléatoire ou systématique soit au niveau de toute la surface, soit au niveau de chaque strate préalablement délimitée sur la carte, (telles que les unités administratives ou géographiques).

Pour des raisons de commodité, les placeaux d'échantillonnage sont souvent choisis directement sur les photographies. On considère comme surface utile d'une photographie le rectangle central, dont les côtés sont délimités à partir des recouvrements longitudinaux et latéraux moyens. Les placeaux sont choisis dans chaque surface utile (rectangle) d'après un tirage systématique ou aléatoire. Si la topographie est uniforme et si les recouvrements sont à peu près constants, une distribution systématique des points au niveau de chaque photographie se traduit pas une distribution à peu près systématique sur toute la zone inventoriée.

Du fait des variations d'échelle et des recouvrements, l'intensité d'échantillonnage - qui est la même pour chaque rectangle - varie d'une photographie à l'autre. On doit utiliser un facteur de correction pour chaque placeau d'une même photographie, (ou d'un groupe de photographies d'échelle et de recouvrement voisins), afin de tenir compte de ces variations d'intensité d'échantillonnage lorsque celles-ci sont significatives 1/.

On peut utiliser pour l'interprétation un échantillon systématique ou aléatoire de photographies plutôt que toutes les photographies. On a alors un plan d'échantillonnage à deux degrés dans lequel les surfaces rectangulaires utiles des photographies retenues sont les unités primaires alors que les placeaux sont les unités secondaires, (le procédé d'estimation peut être celui du paragraphe 422.121.111 du chapitre III: ''estimation d'une proportion'', à condition que la disposition des placeaux sur chaque photo ne soit pas systématique).

334.3 Photointerprétation avec délimitation

Lorsque l'on a besoin d'établir une carte forestière, il faut délimiter sur la photographie les différentes classes. On délimite tout d'abord la surface utile de chaque photographie et on ne délimite les classes de végétation que sur cette surface utile. Des instructions détaillées doivent spécifier les dimensions de la plus petite surface à délimiter, (en fonction des échelles de la photographie et de la carte définitive), la précision de cette délimitation, ainsi que d'autres facteurs tels que le degré d'éclairement des photographies sous vision stéréoscopique, le type de stylo ou de crayon à utiliser, le gommage des erreurs, etc.

4 Cartographie forestière à partir de photographies aériennes conventionnelles

41 Introduction

On réalise la cartographie après que la photointerprétation et la délimitation des différentes formations forestières et végétales ont été effectuées. Il n'y a pas d'autre solution si on n'emploie pas de stéréorestituteurs (voir paragraphe 42). Si l'on peut en

1/ D'autres méthodes de correction plus perfectionnées existent. L'une d'elles consiste à déterminer la surface réelle de chaque photographie et à utiliser un coefficient de correction qui est fonction de l'échelle de la photographie.

employer, la photointerprétation et la restitution peuvent se faire simultanément, car l'opérateur a alors une vision stéréoscopique de la zone à cartographier. Des stéréorestituteurs du troisième ordre peuvent être achetés spécialement pour une opération d'inventaire, alors que ceux du premier et du deuxième ordre appartiennent en général aux instituts de photogrammétrie.

Comme il a été indiqué au paragraphe 1, on suppose qu'il existe une cartographie topographique ou planimétrique convenable de toute la zone inventoriée, à une échelle appropriée.

42 Restitution à partir de photographies simples

Dans ce cas, l'opérateur n'a pas une vision stéréoscopique de la zone à cartographier, puisqu'il ne dispose que d'une seule photographie à la fois. L'interprétation stéréoscopique est supposée faite avant la cartographie et ne pourra donc être vérifiée ou corrigée lors de cette opération. C'est un inconvénient important mais en revanche, les instruments utilisés sont plus simples et moins coûteux. Ils doivent pouvoir permettre d'adapter l'échelle des photographies à celle de la carte. Il faut aussi pouvoir ajuster la photographie autour de son centre afin de la corriger le cas échéant en fonction des variations de relief et de pouvoir faire coïncider optiquement les divers points du terrain sur la photographie et sur la carte. Afin d'éviter une trop grande manipulation des photographies, la restitution doit se limiter à la partie utile de chaque photographie (voir paragraphe 334.3)

Les appareils les plus couramment utilisés sont ceux qui sont basés sur le principe de la ''chambre claire''. La plupart d'entre eux sont dits ''sketchmasters'', (Zeiss Aerosketchmaster, Sketchmaster Aero Service Universal and Vertical, Sketchmaster Abrams Oblique. La description suivante de ce type d'appareil est tirée du ''Manuel de Photo-interprétation'' de la Société Américaine de Photogrammétrie: ''l'observateur perçoit deux images superposées, l'une venant de la photographie, l'autre d'un document (carte) au moyen d'un miroir semi-transparent qui réfléchit et transmet la lumière. L'oeil reçoit l'image du manuscrit à travers ce miroir. L'opérateur peut ajuster l'instrument de telle sorte que les parties étudiées des photographies coïncident avec leur position réelle sur la carte manuscrite. La plupart des organes des chambres claires peuvent être relevés ou abaissés pour modifier l'échelle ou encore inclinés pour compenser les inclinaisons des photographies''. Le rapport des échelles de la photographie et de la carte peut en général être de 1:3 ou 1:4.

Ce type d'appareil est particulièrement recommandé pour réaliser la restitution à partir d'une seule photographie si le relief n'est pas trop important et si les strates ne sont pas trop petites ou trop imbriquées. Si ce n'est pas le cas, il peut être préférable de faire une restitution visuelle sans utiliser d'appareil.

43 Restitution à partir de stéréogrammes

L'avantage majeur de ce genre de restitution par rapport aux photographies simples est qu'il permet une photointerprétation simultanée, ou la vérification et la correction des interprétations existantes.

Les appareils les plus simples et les plus utilisés appartiennent à deux groupes qui sont:

- les stéréorestituteurs à lignes radiales du troisième ordre tel que le restituteur Kail ou le restituteur Hilger et Watts dont le principe est que chaque point du terrain correspond à l'intersection de deux lignes, dont chacune passe par le centre de l'une des deux photographies (''lignes radiales''): les lignes sont déplacées de telle façon qu'elles passent par les points situés à la limite des formations forestières. Un mécanisme qui peut être un pentographe relie leur intersection à un crayon qui marque sur la carte ou sur le manuscrit de référence. Ces appareils ne corrigent pas l'inclinaison et ne sont pas pratiques pour restituer les détails proches de la ligne de vol.

- Le Multiscope et le ''Stereosketch Hilger Watts'' sont formés d'un miroir stéréoscopique couplé à une chambre claire. On peut incliner soit les photographies dans le premier appareil soit le plateau du deuxième afin de rectifier l'image photographique et de tenir compte des déformations dues au relief. On peut d'autre part ajuster les différentes échelles en introduisant des lentilles différentes ou en faisant monter ou descendre le plateau (Stereosketch).

- On peut utiliser des stéréorestituteurs plus perfectionnés appliquant le principe de coïncidence (comme, par exemple, barre de parallaxe), tels que le ''Zeiss stereopret'' ou des stéréorestituteurs du troisième ordre, (Zeiss Stereotope'' ou ''S.O.M. Stereoflex'').

5 Estimation des surfaces à partir des photographies aériennes et des cartes

51 Remarques préliminaires

Comme nous avons pu le voir au paragraphe 334, l'estimation des surfaces des différentes formations végétales ou forestières n'implique pas nécessairement la cartographie de la zone. On peut faire une estimation objective en affectant tout point photointerprété à sa formation végétale ou forestière, à condition que le plan d'échantillonnage soit bon et que l'on applique des coefficients de correction pour tenir compte des variations possibles d'échelle et de recouvrement des photographies.

La précision des estimations doit être du même ordre de grandeur que l'erreur totale (erreurs de sondage et erreurs de mesure): une précision à un hectare près n'a pas de sens si l'erreur totale est de l'ordre de 100 hectares.

Les surfaces seront exprimées dans la mesure du possible, dans le système métrique. Si on utilise le système anglo-saxon, on donnera les résultats à la fois dans le système métrique et dans le système anglo-saxon, comme cela est demandé dans tous les inventaires de la FAO.

Quelle que soit la méthode utilisée pour estimer la surface d'après les cartes, la précision de l'estimation augmentera avec l'échelle. Il est donc important, quand on restitue les détails photographiques sur des cartes, de ne pas choisir une échelle trop petite par rapport à celle des photographies.

Sur une carte forestière les détails inférieurs à une dimension minimum donnée ne sont pas cartographiés. Cette convention est en général nécessaire pour faciliter la lecture des cartes, mais elle peut aboutir à des estimations biaisées de certaines formations forestières. Ainsi, lorsque les forêts sont classées d'après la taille des massifs, la superficie de la classe correspondant aux plus petits massifs sera sous-estimée. Il ne faut pas l'oublier lorsqu'on estime les superficies forestières d'après des cartes à petite échelle.

Si l'on veut estimer les surfaces sur les cartes, il est essentiel que celles-ci soient tracées sur du papier ayant un coefficient de stabilité dimensionnelle élevé, notamment s'il s'agit de papier calque, car le papier calque ordinaire disponible dans le commerce est extensible dans des proportions atteignant 15 pour cent. De nombreux matériels stabilisés existent (à base de polyesters ou d'esters, ces derniers étant moins stables), et leur utilisation est recommandée en cartographie afin d'éviter des biais importants et inconnus dans l'estimation des surfaces.

Il existe plusieurs méthodes pour mesurer les surfaces d'après les cartes. On décrit ici les méthodes planimétriques et les techniques d'échantillonnage, car les autres sont considérées comme moins pratiques, tout au moins dans la plupart des cas (comme celle qui utilise des formules géométriques et les coordonnées et celle basée sur la pesée).

52 Mesures directes effectuées par planimétrie sur cartes

On connaît depuis longtemps le planimètre manuel, mais il existe actuellement des planimètres électroniques tels que le Planimètre Electronique ''Stanley Cintel'' ou le ''Kimoto Electronic Scanning Planimeter'' qui sont plus rapides et plus précis. En plus de la nécessité d'utiliser un papier stable du point de vue dimensionnel, on doit prendre d'autres précautions, ainsi, on aura soin:

a) de corriger l'indicateur d'échelle fournie avec l'instrument à l'aide d'une surface type en général également fournie avec l'instrument;

b) de vérifier que la roulette de mesure est parallèle au bras traceur;

c) d'éviter un glissement de la roulette lors de l'opération de mesure;

d) de réaliser un nombre de mesures suffisant pour réduire l'erreur de mesure.

A moins d'avoir un planimètre électronique, il vaut mieux utiliser des méthodes statistiques (surtout le système par grille de points), car elles sont moins sujettes aux erreurs de mesure et elles permettent de calculer l'erreur d'échantillonnage.

53 Méthodes d'estimation fondées sur les techniques d'échantillonnage

531 Estimation des surfaces à partir de cartes. Le principe de ces méthodes consiste à évaluer la proportion d'une surface connue exactement (comme la surface totale de la carte) qui est occupée par une formation forestière donnée. Cette proportion est estimée par des dispositifs systématiques:

- soit de points, dont chacun prend la valeur 1 s'il appartient à la formation ou la valeur 0 s'il est en dehors de cette formation (système de la grille de points);

- soit de lignes parallèles (ou ''transects'') à chacune desquelles correspond la partie qui appartient à la classe considérée; ce système est moins utilisé que l'autre car il impose de mesurer des longueurs.

On estime les surfaces des formations en multipliant le nombre de points appartenant à chaque formation (système de la grille de points), ou la somme des longueurs des transects situées dans la formation, par le facteur ''d'extension'' de la surface, (à savoir, la surface du carré unitaire de la grille ou la longueur unitaire multipliée par l'écartement des lignes.

On ne peut utiliser la formule d'erreur du paragraphe 422 du chapitre III pour estimer une proportion dans le cas de la méthode de la grille de points car les points (unité d'échantillonnage) ont une distribution systématique. Plusieurs auteurs ont étudié ce problème et ont pu établir des formules d'erreur. La formule suivante donne une bonne approximation de l'erreur type (d'après Chevrou - 1971):

$$e(\%) = 56{,}5\frac{\sqrt{k}}{n^{3/4}}$$

où:

- $e(\%)$ est l'erreur, en pourcentage, de l'estimation de la surface d'une classe de formation forestière;
- n est le nombre de points appartenant à cette classe;
- k est un facteur qui dépend de la forme de cette surface et qui augmente avec l'irrégularité de la surface. Le coefficient prend des valeurs comprises entre 5 et 7 si la surface est régulière.

En prenant une valeur constante pour k, égale à 7, on aura approximativement:

$$e(\%) = \frac{150}{\sqrt{n}}$$ ce qui correspond aux valeurs suivantes de n:

e%	10	5	2	1	0,5
n	37	93	310	780	1970

On doit effectuer avec soin chaque comptage de points et le faire refaire, de préférence par un autre opérateur. Si les deux comptages donnent des résultats significativement différents, on devra en faire au moins un troisième. Afin d'éviter des erreurs de comptage, on recommande l'utilisation de petits compteurs manuels. Le comptage peut se limiter aux parties marginales de la zone, la partie centrale étant divisée en rectangles ou en carrés de surface connue. Si l'on trouve une légère différence entre la somme des surfaces des formations forestières estimées par comptage de points et la valeur connue de la surface totale, chaque unité devra être corrigée par le rapport entre cette valeur réelle et le total estimé.

On peut dans certains cas, combiner le comptage de points et la planimétrie. Ainsi on estimera les surfaces des unités d'inventaire par planimétrie, en corrigeant les estimations par le rapport de la valeur réelle de la surface totale inventoriée à la somme des estimations; on pourra obtenir par comptage les surfaces des strates dans chaque unité d'inventaire, en les corrigeant suivant le même principe.

532 Estimation des surfaces à partir de photographies

On utilise en général des méthodes d'échantillonnage où les points sont remplacés par des placeaux. Il n'est pas nécessaire de délimiter les classes forestières sur les photographies à moins que le nombre de placeaux par photographie ne soit grand. Des exemples d'échantillonnages, à un ou deux degrés, sont donnés au paragraphe 334.2 ci-dessus. D'autres dispositifs sont possibles: on peut imaginer, par exemple, un plan d'échantillonnage à trois degrés où les unités primaires sont des bandes parallèles mais non adjacentes, les unités secondaires étant des photographies appartenant à ces bandes et les unités tertiaires, des placeaux dans la surface utile de chaque photographie sélectionnée. On peut aussi envisager des échantillonnages à plusieurs degrés qui utiliseraient des couvertures photographiques différentes, comme, par exemple, une couverture par satellite et deux couvertures aériennes, l'une à petite échelle et l'autre à plus grande échelle (voir paragraphe 622).

54 Estimation continue des surfaces

Par ''estimation continue des surfaces'', on entend l'estimation des surfaces à différentes époques en effectuant plusieurs couvertures aériennes successives. L'estimation répétée des surfaces forestières est d'une importance capitale dans les pays tropicaux car le couvert forestier est menacé dans de nombreux endroits, et il faut suivre ses variations pour mieux les contrôler et permettre l'élaboration d'une politique appropriée d'utilisation des sols. Ces études ont comme fondement statistique l'analyse de régression, et certaines des méthodes utilisées sont identiques à celles d'un inventaire forestier continu réalisé sur le terrain (voir chapitre VII). Chaque couverture peut être partielle ou complète. Si la première est complète, on pourra étudier les modifications à partir d'une nouvelle couverture partielle par régression simple((une telle étude a été effectuée en Côte-d'Ivoire, à l'aide d'une couverture complète au 1/50 000 de 1956 et d'une couverture partielle au 1/40 000 de 1966.

Si l'on ne dispose que d'une couverture complète ou partielle ancienne et si on ne prévoit pas d'erreur significative d'interprétation, l'estimation des modifications peut être obtenue par régression à partir de la vérification sur le terrain des parcelles photographiques bien repérées sur le terrain et préalablement interprétées sur photographie.

Comme dans le cas d'un inventaire forestier continu, on peut interpréter une partie des placeaux photographiques de l'ancienne couverture sur les nouvelles photos, en les reportant soigneusement sur celles-ci. A chaque nouveau sondage, on pourra interpréter un échantillon partiel des nouveaux placeaux.

Avec le développement rapide des techniques de la télédétection, et le souci croissant du maintien du couvert forestier, il est permis de penser que ces travaux de surveillance des forêts se développeront considérablement dans un proche avenir aux niveaux tant local et national que régional et mondial. La théorie des sondages offre un éventail assez grand de techniques qui sont utiles et efficaces, à condition d'être appliquées soigneusement et judicieusement.

6 Progrès récents des techniques de télédétection et de cartographie

61 Aperçu des techniques récentes

611 Nouvelles méthodes de télédétection. La photographie aérienne panchromatique classique est fondée sur le principe suivant:

Elle reproduit grâce à une pellicule recouverte d'une émulsion de grains de sel d'argent l'intensité relative des radiations électromagnétiques naturelles de l'ensemble des bandes du spectre visible (ensemble éventuellement limité par un filtre), l'appareil photographique se trouvant à bord d'un avion. Les innovations en matière de détection à distance par rapport à la photographie aérienne panchromatique habituelle portent sur l'une ou sur plusieurs à la fois des caractéristiques soulignées dans la définition précédente.

611.1 Nouvelles plateformes

a) Le lancement et la mise sur orbite terrestre d'un satellite (habité ou inhabité) est maintenant devenu une opération banale. Si de plus, sur ce satellite, sont installés des détecteurs à distance (appareils de prises de vues ou ''scanners'') et d'autres appareils capables d'emmagasiner ou de transmettre les images ou ''signaux'' recueillis (système de télévision, reproduction des signaux sur bande magnétique), on peut alors disposer d'images photographiques, télévisées, ou encore de données sur support magnétique correspondant aux radiations reçues des zones survolées. Les images obtenues ont des avantages:

- elles permettent de couvrir en un seul cliché une très grande zone (de l'ordre de 2 à 3 millions d'ha pour des clichés 70 mm x 70 mm à l'échelle du 1/2 500 000e);
- les distorsions dues au relief sont négligeables et le cliché a la valeur planimétrique d'une carte.

Par contre elles ont un inconvénient majeur qui est celui de leur faible ''résolution au sol'' 1/ qui correspond à une distance en général supérieure à 80 m. La hauteur de prise de vues constitue un facteur limitant de la résolution au sol, mais celle-ci dépend également de la nature de l'image obtenue. Si la photographie est directement obtenue à partir de l'impression d'une pellicule sensible, la résolution au sol dépendra aussi de la finesse du grain de l'émulsion. Par contre elle sera fonction de l'intensité du balayage par les ''scanners'' du système de télévision employé dans le cas d'une utilisation de ces dispositifs, sur les satellites non habités notamment.

b) A l'opposé, des expériences ont été menées au Canada de photographies à très grande échelle (1/1 500 et supérieures) à partir d'hélicoptères ou de petits avions de tourisme destinés à différencier certaines espèces entre elles (par exemple le Picea glauca et Abies balsamea), à quantifier les dégâts causés par des épidémies et attaques d'insectes et à évaluer les caractéristiques du potentiel des forêts grâce à des mesures photogrammétriques et des tarifs de cubage ''aériens''. Des expériences ont été faites en forêt tropicale américaine pour l'identification des espèces.

1/ C'est-à-dire la dimension du plus petit objet détectable sur l'image pour un contraste donné.

Le problème le plus difficile a été de mettre au point un système altimétrique très précis, la mesure très exacte de la hauteur de l'appareil au sol étant indispensable pour avoir une bonne estimation de l'échelle et par suite des données photogrammétriques suffisamment exactes: les premiers altimètres utilisés opéraient à partir de radiations radar qui ne transperçaient pas toute la couverture végétale.

611.2 Autres radiations électromagnétiques

Le tableau suivant tiré du livre ''Remote Sensing, with special reference to Agriculture and Forestry'' indique les intervalles de longueur d'onde et de fréquence des différentes radiations électromagnétiques ainsi que les détecteurs correspondants utilisés pour l'étude des ressources naturelles.

Les photographies panchromatiques utilisent la réflexion par les objets des radiations électromagnétiques du spectre visible de longueur d'onde comprise entre 0,38 μ et 0,78 μ. La véritable innovation dans le domaine de la détection à distance, moins spectaculaire certes que l'emploi des plateformes spatiales, a été l'utilisation d'intervalles de radiations autres que ceux du spectre visible.

L'utilisation de la partie du proche infrarouge de 0,78 μ à 0,90 μ en association avec les radiations visibles de 0,5 μ (ou 0,6 μ) à 0,78 μ est traitée au paragraphe 321.22

Zone spectrale		Longueur d'onde	Systèmes de détection couramment utilisés
Radiations radar	Décimètre Centimètre Millimètre	10-100 cm 1-10 cm 0,1-1 cm	Antennes balayeuses (réceptrices et éventuellement aussi émettrices).
Radiations infrarouges	IR lointain IR intermédiaire	8-1 000 μ 3-8 μ	Scanners avec détecteurs IR.
	Proche IR	0,780-3 μ	Photographie jusqu'à 1 μ. Scanners avec détecteurs IR.
Radiations ultraviolettes	Proche UV Moyen UV	0,315-0,380 μ 0,280-0,315 μ	Photographie (lentille de quartz). Scanners avec détecteurs photo-électriques.

L'utilisation de l'infrarouge ''thermique'' (3-14 μ), radiations émises en plus grande quantité par des corps plus chauds, est particulièrement adaptée à la détection des feux latents, des maladies et des attaques d'insectes subies par la forêt (lesquelles entraînent un léger échauffement de la végétation).

L'utilisation de radiations radar entre 0,5 cm et 1 m et plus particulièrement entre 0,86 cm et 3,3 cm, lesquelles ont le grand avantage de ne pas être arrêtées par les formations nuageuses et d'être relativement peu atténuées par la pluie s'avère très intéressante dans les régions tropicales où une couverture photographique conventionnelle est très longue à réaliser du fait de la permanence d'un plafond nuageux assez bas.

611.3 Appareil photographique et ''scanners''

L'utilisation de nouvelles radiations et les nécessités d'une retransmission automatique et continue (notamment à partir des satellites non habités) ont développé l'utilisation de ''scanners 1/''. Un scanner simple est constitué d'un dispositif optique (en général miroir rotatif associé à un miroir parabolique) et d'un détecteur transformant en signaux électriques

1/ Du verbe anglais ''to scan'' qui signifie examiner et qui peut se traduire, en matière détection à distance, par balayer (au sens de ce verbe auquel il est fait référence d ''balayage d'une image'').

les variations d'intensité des radiations d'une certaine bande du spectre (à l'instar d'une cellule photo-électrique): grâce au mouvement de son système optique et au mouvement de l'avion, le ''scanner'' balaye par bandes parallèles contiguës la scène à observer. Les signaux électriques sont, ensuite, reçus dans un tube à rayons cathodiques pour être visualisés sur un écran de télévision ou être imprimés sur une pellicule sensible. Ils peuvent également être transcrits sur une bande magnétique et être ensuite traités sur ordinateur.

611.4 Radiations naturelles et radiations artificielles

Les radiations utilisées dans les photographies conventionnelles sont des radiations naturelles réfléchies par l'objet photographié et qui proviennent principalement du soleil soit directement soit indirectement par l'intermédiaire d'autres objets ayant répercuté ces radiations par réflexion ou ''transmission''. Certains systèmes de détection à distance (dispositifs radar ''actifs'') utilisent des radiations émises spécialement (''artificielles'') et réfléchies par les objets photographiés. Ces systèmes peuvent ainsi détecter sans difficulté pendant la nuit.

611.5 Sélection des bandes

Un autre élément important dans le domaine de la détection à distance est la réception séparée des radiations reçues par bande de longueur d'onde. L'intérêt d'isoler certaines bandes du spectre est évident: ainsi deux objets qu'il est utile de différencier peuvent réfléchir avec une même intensité globale l'ensemble des radiations du spectre visible tout en réfléchissant avec des intensités très différentes une bande donnée du spectre visible: on les distinguera ainsi beaucoup mieux sur une image reproduisant la réflexion par eux des radiations de cette bande. On dira que leur ''signature'' ou leur réponse par rapport à cette bande est différente.

L'application du principe de la sélection des bandes n'est pas nouveau: le filtre jaune destiné à arrêter les radiations de longueur d'onde inférieure à 0,50 μ est un exemple de sélection puisqu'elle revient à sélectionner la bande 0,50 μ à 0,78 μ du spectre visible. De même la photographie couleur classique implique cette sélection puisque dans ces émulsions une couche jaune reçoit les radiations de 0,38 μ à 0,48 μ, une couche magenta celle de 0,50 μ à 0,58 μ, une couche cyan de 0,60 μ à 0,78 μ, les trois images étant superimposées (à la différence du film panchromatique noir et blanc où une seule image est constituée). Un exemple intéressant de film couleur est celui utilisé en Russie (film ''spectrozonal'') dont l'émulsion n'a que deux couches seulement et qui s'est avéré très utile en matière forestière.

La sélection séparée des bandes s'opère essentiellement de deux manières nouvelles:

- par des ensembles de plusieurs appareils photographiques (jusqu'à 27 dans un cas) ou encore par des appareils à plusieurs objectifs: chacun des appareils (ou chacun des objectifs) correspond à une combinaison donnée émulsion-filtre; le système permet ainsi d'obtenir des images simultanées différentes de la même scène, correspondant chacune à une bande donnée du spectre;

- par un système équivalent où l'appareil photographique est remplacé par un détecteur: plusieurs détecteurs opèrent ensemble, chacun reproduisant les radiations émises par les différentes parties de l'objet dans une bande déterminée du spectre. C'est le système dit ''multispectral line scanner''. Il est constitué par un seul dispositif optique faisant converger l'ensemble des radiations sur un prisme qui les disperse suivant leur longueur d'onde: le faisceau obtenu passe ensuite au travers d'un certain nombre de détecteurs sensibles chacun à une bande donnée du spectre et les signaux reçus sont alors transformés soit en image télévisée, soit en image photographique (dans ces deux cas par l'intermédiaire d'un tube à rayons cathodiques) soit encore en informations stockées sur un support magnétique.

612 Nouvelles formes de reproduction des informations recueillies. Jusqu'à présent les informations recueillies ont été rassemblées sous la forme de photographies en noir et blanc ou couleurs sur support opaque ou transparent, en négatif ou en positif, directement issues par simple réaction chimique (révélateur sur émulsion) de la pellicule impressionnée. Pour longtemps encore et pour une grande part de son travail, le forestier continuera à utiliser ce type de support d'information.

La grande innovation dans le domaine de la reproduction est l'utilisation du tube à rayons cathodiques. Les informations électriques transmises par un détecteur sont transformées par le tube en informations lumineuses. C'est le principe de la télévision appliqué à l'enregistrement de radiations qui ne sont pas limitées au seul spectre visible. La représentation obtenue peut être donc une image en noir et blanc ou en couleurs sur un écran de télévision mais cette image peut être directement obtenue par impression d'une pellicule à la sortie du tube. C'est ainsi qu'on obtient des clichés en noir et blanc à partir de la détection de radiations de l'infrarouge thermique ou de radiations ''radar''. Ces mêmes clichés peuvent être traduits en images en couleurs de convention codées, chaque nuance de gris correspondant à une teinte et une nuance dans cette teinte, ce qui permet des différenciations à l'oeil nu impossibles sur le cliché noir et blanc correspondant. Enfin les impulsions électriques à la sortie du ''scanner'' peuvent être répertoriées sur des bandes ou des disques magnétiques.

613 Nouveaux procédés d'analyse des informations recueillies. L'analyse des photographies aériennes conventionnelles - ou ''photointerprétation'' - utilise l'oeil et le cerveau humains, aidés par des appareils optiques (appareils grossissants, stéréoscopes). Malgré les grandes faiblesses de l'interprétation humaine, ce type d'analyse continuera à se faire aussi bien sur les clichés conventionnels que sur les clichés en noir et blanc ou couleurs correspondant à des radiations en dehors du spectre visible.

Un dispositif simple permettant d'améliorer l'interprétation humaine des clichés obtenus est la projection simultanée. Elle consiste, par un système de projection multiple, à projeter sur un même écran les images positives transparentes en noir et blanc d'une même scène obtenues chacune à partir d'une bande de longueur d'onde donnée, chaque projection étant faite avec un filtre couleur particulier. Le résultat obtenu est une image en ''fausses couleurs''. L'intérêt de ce dispositif est que les différentes nuances de gris sont transformées en un nombre beaucoup plus grand de différences de couleurs et de nuances dans chaque couleur. En modifiant les filtres on peut obtenir l'image en ''fausses couleurs'' qui rend le mieux la différence entre deux objets non discernables sur les clichés noir et blanc.

L'analyse microdensitométrique consiste à transcrire sur un graphique les variations d'intensité lumineuse d'un spot lumineux ayant traversé un cliché transparent. Le système opère grâce à un détecteur transformant en impulsions électriques les variations d'intensité lumineuse, les impulsions étant amplifiées et transmises à un stylet sur un graphique. Un type de couronne d'arbre peut être ainsi reproduit par une certaine forme de courbe. On imagine les perspectives offertes par cette technique: si l'on rentre en ordinateur le type de courbe correspondant à une essence donnée avec les fluctuations tolérées, il devient possible, le dispositif microdensitométrique étant relié à l'ordinateur, de compter (et de faire des calculs sur) le nombre de cimes correspondantes rencontrées.

D'une manière plus générale l'introduction en ordinateur des supports magnétiques stockant l'ensemble des informations relatives aux signaux électriques produits par des ''scanners'' détectant les radiations provenant de la scène observée (ou d'une image photographique de celle-ci) permet un traitement automatique (et objectif) de l'information ainsi recueillie. L'ordinateur pourra ainsi, s'il a enregistré également les données de la trajectoire de l'avion, permettre le repérage des points chauds observés par le détecteur infrarouge thermique. On conçoit aisément la supériorité dans de nombreux cas de ce traitement des signaux recueillis et amplifiés sur l'interprétation humaine, surtout en dehors du spectre visible où les clichés obtenus ont une faible ressemblance avec les images visuelles auxquelles nous sommes habitués.

614 L'orthophotographie. Une technique nouvelle est née en matière de restitution à partir des photographies aériennes. Elle consiste, à partir d'un stéréogramme, à reproduire photographiquement et sans distorsion géographique la portion de terrain commune aux deux photographies du stéréogramme. L'orthophotographie est donc une restitution photographique, au lieu de la restitution cartographique classique aboutissant aux cartes topographiques. L'ensemble des orthophotographies correspondant à une région donnée, peuvent donc être accolées les unes aux autres et forment ce qu'on appelle un orthophotoplan ayant la même valeur planimétrique qu'une carte. Sur cette carte photographique peuvent être reproduites automatiquement des lignes tracées sur les stéréogrammes - comme des limites de types de forêt par exemple - et bien entendu les courbes de niveau. La restitution des limites forestières peut se faire également sous stéréoscope à partir du stéréogramme constitué de la photographie maquillée et de l'orthophotographie correspondante.

Le principal intérêt de ce dispositif est qu'il permet une cartographie plus complète et plus concrète que la cartographie habituelle. Un autre avantage est la relative rapidité d'exécution, dix fois plus grande environ que celle des cartes classiques. Son prix reste cher: ainsi la restitution par orthophotographie de la partie utile d'un cliché 24 x 24 coûte entre 80 et 140 dollars, le prix dépendant de l'échelle et de la quantité d'informations complémentaires à restituer (limites de types de forêts par exemple). Si l'on ajoute à cela la restitution des courbes de niveau le coût oscille entre 160 et 250 dollars environ.

62 Applications forestières déjà opérationnelles

Les combinaisons possibles de ces différentes innovations sont bien sûr très nombreuses et un champ immense d'application leur est ouvert dans le domaine de l'évaluation des ressources naturelles. A l'heure actuelle les applications en matière forestière et d'étude de la végétation sont pour une large part à l'état de recherche et d'expérimentation. D'une manière générale leur mise en oeuvre, même lorsqu'il ne s'agit pas d'observations spatiales, suppose une infrastructure technologique et des moyens financiers qui ne sont pas à la portée de tous les instituts et même de tous les gouvernements. Dans les paragraphes qui suivent on se borne à indiquer quels sont les procédés accessibles et/ou opérationnels dans le domaine de l'évaluation des ressources forestières.

621 Utilisation des radiations en dehors du spectre visible

621.1 Utilisation des radiations de l'infrarouge thermique

Plusieurs systèmes de détection avancée des feux de forêts méritent d'être décrits, bien qu'ils n'intéressent pas directement l'inventaire forestier. Le plus perfectionné utilise un avion volant à l'altitude de 7 000 m et transportant un ''scanner'' enregistrant les radiations IR de 3 à 6 μ et de 8 à 14 μ. Les signaux électriques correspondant aux radiations de 8 à 14 μ sont transmis à un tube à rayons cathodiques pour impressionner en continu une pellicule dont le développement est réalisé très rapidement. Le faisceau des radiations de 3 à 6 μ est utilisé pour signaler le point chaud au moment où celui-ci est détecté. Un calculateur intégrant les données de l'itinéraire de l'avion (vitesse terrestre, altitude, orientation, dérive) détermine la vitesse de déroulement du film et inscrit en bordure de celui-ci une marque à la verticale de chaque unité de longueur parcourue. L'observation des photographies obtenues permet de localiser les points chauds et d'intervenir avant que le feu ne se développe.

621.2 Utilisation des radiations radar

Un dispositif radar ''actif'' (c'est-à-dire enregistrant le faisceau réfléchi par les objets au sol des radiations émises par lui-même) a été utilisé avec succès dans la zone de forêt dense tropicale américaine (au Nicaragua, dans le sud-est de Panama et dans le nord-ouest de la Colombie), et a permis de cartographier des zones couvertes en permanence par un plafond nuageux assez bas. Une opération très importante analogue est actuellement en cours dans le nord-ouest de l'Amazonie brésilienne.

Le principe de base est toujours le même, à savoir un ''scanner'' (dans ce cas une antenne) balayant par bandes transversales à la direction du vol le terrain observé, les signaux électriques étant introduits dans un tube à rayons cathodiques qui impressionne en continu un film. Une particularité de ces dispositifs est à noter: la bande photographiée ne se trouve pas à la verticale de l'avion mais sur le côté (''side-looking radar''), afin de permettre une meilleure détermination de la distance au sol à partir des mesures chronométriques.

L'échelle originale des clichés obtenus au Panama est de l'ordre de 1/200 000e. Ils ont permis dans la région Sud-Est (partie Sud de la province de Darien) une cartographie planimétrique satisfaisante au 1/250 000e et la cartographie de la végétation par grandes classes. Les bornes astronomiques ayant permis la cartographie étaient constituées de petites pyramides métalliques dégagées de toute végétation, de coordonnées connues et facilement repérables sur les clichés radar.

622 Utilisation des plateformes spatiales

622.1 Programme ERTS

Plusieurs milliers de satellites ont déjà été lancés à des fins diverses (observations météorologiques, transmissions intercontinentales, études des radiations, etc.). Dans le domaine de l'évaluation des ressources naturelles des informations provenant de certains vols tels que les vols Gemini et Apollo ont permis des études particulières. Un grand pas vient d'être franchi le 23 juillet 1972 par le lancement aux Etats-Unis d'un satellite destiné à l'observation des ressources naturelles de la planète, satellite nommé ERTS-A (ERTS comme Earth Resources Technology Satellite).

Le vol ERTS-A. Les caractéristiques de ce vol sont les suivantes:

- durée de vie: 1 an;
- altitude: 920 km sur une orbite synchrone avec le soleil;
- couverture répétée de la même zone tous les 18 jours,
- distance terrestre entre deux passages: 160 km;
- détecteurs à bord du satellite:
  - un système de télévision (RBV) enregistrant des images dans trois bandes du spectre visible et la partie infrarouge;
  - un ''scanner'' multiple (MSS) enregistrant dans quatre bandes du spectre visible et de l'infrarouge: les signaux électriques sont codés et enregistrés sur bande.

L'échelle des clichés originaux obtenus (70 mm) - pour chacune des bandes obtenues et aussi pour les images composées couleur - est environ de 1/2 500 000e. Chaque cliché correspond à un carré de 180 km de côté soit 33 000 km2. La résolution au sol des clichés varie entre 60 et 150 m suivant le contraste de la scène étudiée et le détecteur considéré. Le recouvrement longitudinal et latéral est faible et de l'ordre de 15 pour cent. A la date de rédaction de ce manuel, il est encore impossible d'indiquer le véritable intérêt de ces images dans le domaine des inventaires forestiers tropicaux, mais on peut prédire qu'elles seront utiles pour déterminer les grands types de végétation et de forêts dans les inventaires forestiers à grande échelle, surtout si on les combine avec d'autres couvertures aériennes (cf. paragraphe ci-dessous).

622.2 Dispositifs à plusieurs degrés qui utilisent des photographies spatiales

Un dispositif statistique, dont le principe est simple mais dont la formulation mathématique est plus complexe, a été conçu pour les inventaires de zones étendues 1/. Il utilise

1/ Voir ''The benefits of multi-stage variable probability sampling using space and aircraft imagery'' par Philip G. Langley dans l'Application de la télédétection en foresterie, rapport fait conjointement par le groupe de travail sur la télédétection de l'ancienne section 25 de l'IUFRO.

une couverture photographique aérienne auquelle on superpose une grille quadrillée. Un certain nombre de carrés sont choisis proportionnellement à leur surface forestière, celle-ci étant évaluée par photointerprétation de photographies spatiales. Une couverture aérienne à petite échelle (1/30 000 au 1/70 000) est alors réalisée pour ces carrés sélectionnés. Un quadrillage est ensuite réalisé sur cette couverture: dans celle-ci, les carrés, choisis sur le même principe que précédemment, sont photographiés à une plus grane échelle (1/5 000 à 1/25 000). Enfin, des parcelles de sondage au sol sont sélectionnées à l'intérieur de ces derniers carrés et les résultats obtenus par les mesures au sol sont extrapolés à l'ensemble de la zone. Cette méthode sera probablement intéressante quand on disposera des couvertures spatiales suffisantes, mais elle restera cependant limitée par sa nature même, à des opérations d'inventaire au niveau national ou régional.

CHAPITRE V

LES MESURES EN INVENTAIRE FORESTIER

CHAPITRE V

LES MESURES EN INVENTAIRE FORESTIER

1 Introduction

De nombreuses caractéristiques des peuplements, en dehors de la surface, sont utiles à connaître pour leur aménagement et on cherche à les estimer dans les inventaires. Les caractéristiques les plus couramment étudiées, qui sont, en général, les plus importantes sont celles qui sont en rapport avec le volume de bois: volume brut, net ou exploitable, ventilé par essences, par groupes d'essences, classes de diamètre ou groupes de classes de diamètre, classes de qualité, jusqu'à la découpe, etc. Ces volumes sont estimés à l'époque de l'inventaire ou pour une époque ultérieure (en estimant l'accroissement en volume). Mais d'autres caractéristiques sont aussi importantes, sinon plus. Le nombre de tiges par unité de surface, ou par essences et classes de diamètre, sont les paramètres de base qui sont, en général, faciles à déterminer à partir des données de base de l'inventaire. Ces paramètres sont indispensables à connaître pour l'aménagement forestier. Il peut être plus intéressant de connaître d'autres paramètres caractérisant le volume sur pied plutôt que ce volume lui-même. Dans de nombreux inventaires forestiers, il paraît plus intéressant, par exemple, d'exprimer le potentiel-bois en termes de valeur, en tenant compte des différentes essences et des différents types de matériel sur pied. L'évaluation des quantités d'autres produits forestiers, tels que le liège, est parfois le principal objectif d'un inventaire forestier. Dans presque tous les inventaires forestiers on aura à estimer d'autres paramètres, caractérisant par exemple la station et l'accessibilité. Dans ce chapitre on se bornera à étudier les problèmes d'estimation des volumes, de l'appréciation de la qualité des volumes et de l'évaluation de l'accessibilité.

Dans la plupart des inventaires forestiers, les renseignements sur le volume sont obtenus par les sondages au sol encore que la stratification par photo-interprétation puisse être basée sur des facteurs liés au volume total des peuplements (tels que la densité et la hauteur des arbres dominants). Pourtant, dans certains pays tempérés, lorsqu'on peut identifier les essences par photo-interprétation, les données sur le volume sont obtenues sur les photographies par des mesures photogrammétriques, complétées par l'étude de quelques échantillons au sol. Cette méthode, efficace pour certaines forêts tempérées, n'est pas utilisable pour les forêts tropicales hétérogènes. C'est pourquoi l'utilisation de la photogrammétrie pour estimer les volumes n'est pas étudiée ici.

L'estimation du volume est basée sur les mesures des caractéristiques des arbres ou des peuplements, (diamètre, hauteur, surface terrière...) et sur les rapports quantitatifs entre ces caractéristiques et les volumes à estimer. L'appréciation de la qualité du bois et, à un moindre degré, l'évaluation de l'accessibilité, sont basées, tout au moins en partie, sur un jugement personnel; elles sont donc, de ce fait, moins objectives. Bien que l'on ne puisse éviter cette subjectivité, on devra essayer de la réduire au maximum afin d'éviter de trop grandes différences d'estimation d'un enquêteur à l'autre voire chez le même enquêteur. Ainsi l'évaluation de la qualité (classement d'un arbre ou d'une partie d'un arbre dans une classe de qualité donnée) se fonde sur le nombre et le type des défauts présents. La classe de qualité doit être assez fine pour que le travail soit utile et assez large pour qu'il ne soit pas trop difficile et pour permettre une fiabilité suffisante. Le même problème se pose lors de l'évaluation des paramètres d'accessibilité et d'exploitation, tels que la portance du sol ou les difficultés du terrain, qui ne sont pas, à proprement parler, mesurées mais qui sont évaluées par référence à une classification déterminée.

Les mesures forestières autres que l'estimation de la surface sont les suivantes:

a) mesure des arbres et des billes sur pied ou après abattage

- comptage et identification des essences: avant toute mesure, on doit rapporter l'arbre à l'échantillon. Cela se fait à l'aide d'un appareil de mesure (tel que le "relascope

de Bitterlich'' dans les sondages par points horizontaux). L'identification des essences n'est pas à proprement parler une mesure, mais c'est une opération fondamentale qui s'avère parfois difficile et longue (notamment dans les inventaires des forêts feuillues tropicales hétérogènes);

- mesure des diamètres (sur et sous écorce), à hauteur d'homme, à la base, à différents niveaux de la tige; mesure de l'accroissement en diamètre, de la hauteur (totale, du fût, de la bille marchande, à partir de la base ou à partir du haut des contreforts, jusqu'à la découpe), de l'épaisseur de l'écorce et des caractéristiques des produits secondaires (épaisseur du liège, par exemple);

b) autres mesures

- évaluation de la régénération par comptage des semis par essences et par classes de densité, et comptage des gaulis et des perchis par classes de hauteur et/ou de diamètre;

- mesures pour évaluer la qualité de la station. Outre la mesure des caractères des arbres et des peuplements on peut estimer la qualité de la station par comptage de la végétation au sol et arbustive et par la mesure des facteurs pédologiques et topographiques;

- mesure des paramètres d'accessibilité;

- mesures diverses telles que celles en relation avec la récolte des graines de différentes essences.

c) évaluation de la qualité des bois sur pied et d'autres facteurs qui ne sont pas obtenus par une véritable mesure, surtout en rapport avec la description des peuplements, la qualité de la station et l'accessibilité.

2 Mesure des arbres

21 Définition des termes

Les définitions suivantes ont été utilisées dans les inventaires forestiers réalisés par la FAO.

a) Fût: dans le cas des arbres ramifiés, c'est la longueur du tronc entre le sol et la base de la cime (voir ci-dessous pour la définition de la cime); dans le cas des arbres droits, c'est la longueur du tronc entre sa base et le sommet de l'arbre.

Remarque: les arbres ramifiés et notamment les espèces feuillues, ont une tige bien développée à la base, mais qui devient moins discernable du fait des ramifications dans la partie supérieure de la cime, (de nombreux arbres appartenant aux espèces feuillues tropicales ont cependant une tige bien dégagée et bien distincte jusqu'à la base de la cime). Les arbres droits tels que ceux de nombreuses essences résineuses ont une tige centrale bien définie qui va de la base jusqu'au sommet. S'il y a une fourche, le nombre de tiges à recenser dépend de l'emplacement de cette fourche par rapport à la hauteur de référence retenue pour la mesure du diamètre (à hauteur d'homme pour les arbres sans contreforts). Si la tige principale est divisée en deux ou plusieurs tiges en dessous de la hauteur de référence, on comptera ces dernières plutôt que la tige principale.

b) Base de la cime: elle est située à la base des plus basses branches de la couronne, vivantes ou mortes. C'est à ce niveau, dans de nombreuses espèces feuillues, que la tige commence à se diviser pour former la cime. Les branches isolées situées au-dessous de ce point ne devraient pas être prises en compte pour déterminer la base de la cime si elles sont situées à une distance supérieure à la moitié d'une longueur de bille donnée des autres branches.

c) Diamètre à hauteur d'homme: diamètre à 1,30 mètre (4,3 pieds) au-dessus du niveau du sol (pour les arbres situés sur des pentes, la mesure doit se faire en se plaçant sur la partie haute). Arbres à contreforts : s'il y a un contrefort et s'il est plus haut qu'1,30 m., la mesure ''à hauteur d'homme'' n'a pas de sens. Les contreforts ont souvent une section irrégulière, ils sont donc difficiles à mesurer d'une manière précise à hauteur d'homme; leur dimension n'a qu'un rapport lointain avec le volume de l'arbre mais aucune méthode standard efficace pour mesurer le diamètre des arbres à contreforts n'a encore été mise au point. On a recours à diverses conventions: mesure juste au-dessus de la partie renflée ou irrégulière, ou à une distance donnée au-dessus de ce point (l'édition précédente de ce manuel recommandait une distance de 30 cm pour les opérations d'inventaire de la FAO).

Remarques: On doit donner des définitions et des instructions précises aux compteurs sur la méthode de mesure du diamètre à hauteur d'homme (définition de ce que l'on entend par ''niveau du sol'', par ''diamètre à hauteur d'homme'' pour les arbres à contreforts, ou pour les tiges de forme irrégulière, etc...). Cela est essentiel pour obtenir des données de base aussi homogènes que possible. Les définitions utilisées se rapprocheront autant que possible de celles employées couramment ailleurs. La comparaison des résultats d'inventaire est en effet parfois impossible du fait de différences de définition. Ainsi, il faudrait considérer que 4 pieds 3 inches'' sont l'équivalent de 1.30 m plutôt que ''4 pieds 6 inches'' comme en Amérique du Nord. Pour que les résultats soient comparables et homogènes (voir paragraphe 24), on devrait utiliser les mesures de diamètre et les classes de diamètre plutôt que les mesures de circonférence.

d) Mesures de hauteur et de longueur: on utilise pour les inventaires de la FAO, la classification suivante des mesures de hauteur et de longueur des arbres sur pied, figure V - 1 tirée de Forest Mensuration par Husch, Miller et Beers).

- Hauteur totale: distance verticale entre le niveau du sol et le sommet de l'arbre.

- Hauteur du fût: distance entre le niveau du sol et la base de la cime: c'est la hauteur libre de la tige principale d'un arbre.

- Hauteur commerciale: distance entre le niveau du sol et le fin bout de la dernière partie commerciale d'un arbre.

  Plusieurs critères peuvent définir le fin bout et sa position exacte est assez subjective et difficile à déterminer parce que, en forêt, la partie supérieure de la tige est masquée par la cime. Le fin bout peut être défini par la découpe minimum, par la présence de ramifications, d'irrégularités, de défauts, etc. L'extrémité de la bille marchande peut coïncider avec la découpe minimum retenue, ou se situer plus bas, mais jamais plus haut. La découpe minimum dépendra de l'utilisation prévue du bois du fût. La définition du bois utilisable et des défauts rédhibitoires devra être aussi précise que possible afin de réduire au maximum et même d'annuler l'influence subjective.

- Hauteur de la souche: distance entre le niveau du sol et le niveau de la tige principale où l'arbre est abattu.

  Cette hauteur dépend des méthodes d'abattage. Pour les arbres à contreforts des pays tropicaux, elle se situe en général juste au-dessus des contreforts.

- Longueur commerciale: somme des longueurs des parties d'un arbre qui sont débitées et utilisées. Elle comprend les chutes qui peuvent être perdues en cours de transformation.

  Trois difficultés apparaissent dans l'évaluation de la longueur commerciale des arbres sur pied. L'évaluation des défauts extérieurs des parties supé-

rieures de la tige par un observateur placé au niveau du sol peut ne pas être suffisamment précise, à moins qu'il n'utilise des jumelles. Deuxièmement les billes qui sont considérées comme exploitables par le personnel de l'inventaire peuvent ne pas coïncider avec celles que l'exploitant voudra couper. Cela est surtout fréquent en forêt tropicale feuillue hétérogène par ce que les marchés locaux et internationaux évoluent, ainsi d'ailleurs que l'accessibilité de la zone inventoriée et les méthodes d'exploitation. Enfin l'estimation de la longueur commerciale des arbres sur pied ne tient le plus souvent compte que des défauts externes alors que les défauts internes ont plus d'influence sur la valeur commerciale.

- Longueur défectueuse: somme des longueurs des parties du fût dont le diamètre est supérieur à la découpe minimum mais que l'on ne peut utiliser du fait d'un défaut.

  On peut faire ici les mêmes remarques que pour l'évaluation de la longueur commerciale.

- Longueur de la cime: distance entre la base de la cime et le sommet de l'arbre.

  Les mesures de hauteur d'arbres sur pied sont des mesures verticales, alors que les mesures de longeur peuvent être réalisées sur des parties inolinées. De plus, les hauteurs commerciales peuvent comprendre des longueurs défectueuses en dessous de la découpe minimum. Il est donc possible que le total des longueurs mesurées soit différent de la hauteur totale mesurée; en d'autres termes, pour un arbre donné, la somme des longueurs commerciales peut être différente de la hauteur commerciale.

22 Comptage

Avant de mesurer un arbre, on doit décider si l'arbre appartient ou non à l'échantillon. C'est le principe de base du comptage et il ne faut pas minimiser son importance. Le comptage n'est pas identique pour des unités de sondage d'une surface donnée et pour un sondage par points ou par lignes.

221 Comptage dans des unités de superficie donnée. Le comptage consiste en deux vérifications.

a) L'arbre appartient-il bien à l'unité de sondage? La distance de l'axe de l'arbre au centre de la parcelle (pour des parcelles circulaires) ou à un côté (ou à un axe) de la parcelle (dans le cas de parcelles carrées ou rectangulaires) doit être inférieure à une certaine longueur. Des instructions détaillées doivent être données aux équipes d'inventaire sur la façon de mesurer cette distance (horizontalement ou suivant la pente du terrain) et sur les arbres limites;

b) Etant donné ses caractéristiques, l'arbre doit-il être compté? Ces caractéristiques sont d'une part l'essence (voir le paragraphe 23 sur les problèmes d'identification des essences) car, dans certains inventaires, notamment en pays tropical, toutes les essences ne sont pas comptées; et d'autre part les dimensions. Le critère de dimension des arbres à dénombrer est, en général, le diamètre minimum et il faut faire, pour la déterminer, des mesures qui ne sont pas toutes enregistrées (voir le paragraphe 24 sur les problèmes de mesure).

222 Comptage dans le cas d'un sondage par points ou par ligne. Le choix des arbres à compter se fait à l'aide d'un appareil de mesure. Dans un sondage par point horizontal, qui est le mode le plus utilisé, on compte un arbre si sa distance horizontale R au point de sondage est inférieure à son diamètre D divisé par un facteur k, égal, dans le système métrique, à:

$$\frac{1}{50}\sqrt{(BAF)},$$

(BAF) étant le facteur de surface terrière de l'appareil (''basal area factor'').

$$R < \frac{D}{k} = \frac{D}{\frac{1}{50}\sqrt{(BAF)}} = \frac{D}{2\sin\frac{\theta}{2}}$$

θ est l'angle de visée-horizontal (l'angle sous lequel on voit un arbre limite à partir du point de sondage)

$BAF = 10\,000 \sin^2 \frac{\theta}{2}$ (dans le syatème métrique)

Tous les arbres proches du point qui répondent aux critères d'essence et de taille minimale, et pour lesquels $R < \frac{D}{K}$, appartiennent à l'échantillon.

Une fois déterminé qu'un arbre appartient à l'échantillon, on peut faire d'autres mesures. L'échantillonnage par points ne sert parfois qu'à estimer la surface terrière du peuplement. A chaque point de sondage la surface terrière par hectare G vaut:

$G = p \times (BAF)$

où p est le nombre d'arbres proches du point de sondage pour lesquels $R < \frac{D}{K}$.

On mesure R et θ dans le plan horizontal de l'oeil de l'observateur. Dans le cas d'un terrain incliné, on doit faire une correction pour chaque arbre en fonction de la pente de la ligne de visée de l'arbre. Les dioptres simples et les prismes, contrairement aux relascopes de Bitterlich, ne permettent pas une correction automatique.

23 Identification des essences

L'identification des essences pose des problèmes dans les forêts tropicales hétérogènes. Elle est particulièrement difficile parce que le nombre d'essences est relativement important parce que quelques-unes seulement sont bien connues botaniquement et que plusieurs d'entre elles se ressemblent. Une identification exacte des essences est, cependant, fondamentale. Il est, en général, beaucoup plus grave de se tromper sur l'essence à laquelle appartient un arbre que sur une ou plusieurs de ses dimensions.

Il est à peu près impossible dans de nombreux inventaires forestiers de concilier la précision botanique avec l'efficacité. Il est en général trop long d'identifier parfaitement les essences. On doit retenir les points suivants lorsque l'on cherche un compromis entre l'exactitude botanique et l'efficacité.

a) Il n'est pas toujours nécessaire d'identifier botaniquement tous les arbres de l'échantillon. On peut avoir recours à divers expédients, tels que:

- Comptage d'un nombre limité d'essences commerciales et commercialisables dans tout l'échantillon, toutes les essences étant comptées dans un sous-échantillon seulement, afin de réduire les coûts d'inventaire tout en obtenant une bonne connaissance de la composition floristique de la forêt inventoriée;

- Comptage de tous les arbres de diamètre supérieur ou diamètre minimum d'exploitabilité et des arbres appartenant aux essences ''recherchées'' ayant un diamètre inférieur à ce minimum. Cette méthode économise du temps car on n'a pas, ainsi, à mesurer et à enregistrer un grand nombre de petits arbres;

- Les essences qui sont rares et qui ont peu de chance d'être exploitées n'auront pas à être identifiées avec précision. On peut les regrouper dans un ou plusieurs groupes ''indéterminés'', éventuellement classés par familles botaniques.

Le choix de l'une des deux premières méthodes suppose que l'on puisse identifier parfaitement les essences commerciales et commercialisables.

b) Afin de compter moins d'arbres, et étant donné que les coefficients de variation des paramètres relatifs aux plus petites classes de diamètre sont plus faibles que ceux des classes de diamètre plus grandes, il est intéressant d'adopter des unités de sondage (ou des échantillons) de taille différente selon les classes de diamètre. Chaque unité de sondage ou de relevé peut, par exemple, être formée de deux ou trois placeaux circulaires concentriques: le plus petit cercle sera l'unité de sondage ou de relevé pour les plus petites classes de diamètre.

c) Une fois définies les modalités de comptage, on s'efforcera d'assurer par tous les moyens une bonne identification des essences. Notamment:

- Les compteurs seront soumis à un entraînement complet et intensif de préférence dans différentes parties de la zone inventoriée;

- Ils seront en nombre limité et ne seront, autant que possible, pas remplacés pour que les données soient homogènes;

- On établira une liste de correspondance des noms locaux (vernaculaires) et scientifiques. C'est en général une tâche longue et difficile car les botanistes n'ont pas les mêmes critères de classement que les gens de la brousse, ce qui entraîne de nombreux décalages (par exemple, il existe plusieurs noms locaux pour une même essence suivant l'âge et le sexe de l'arbre, ou, à l'inverse, il existe un seul nom local pour plusieurs essences et même plusieurs genres traditionnellement utilisés à des fins identiques et limitées.

- On déterminera des critères simples et pratiques pour l'identification sur le terrain à partir d'un nombre limité de caractéristiques telles que l'écorce, la tranche, les feuilles et le fruit;

- On fera collection préliminaire d'échantillons de bois, de feuilles et de fruits à laquelle on pourra se référer;

- Des contrôles seront réalisés par un botaniste ou par le meilleur compteur dans des unités de sondage choisies au hasard et analysées sur place de manière à pouvoir donner des instructions correspondantes aux équipes.

- On aura recours à un contrôle botanique systématique tel que celui qui a été réalisé au Sarawak: on a recueilli un échantillon de feuilles placées dans des sacs différents pour chaque arbre de l'échantillon. Ces sacs ont été envoyés à un botaniste qui a comparé le nom local donné par le compteur avec sa propre identification.

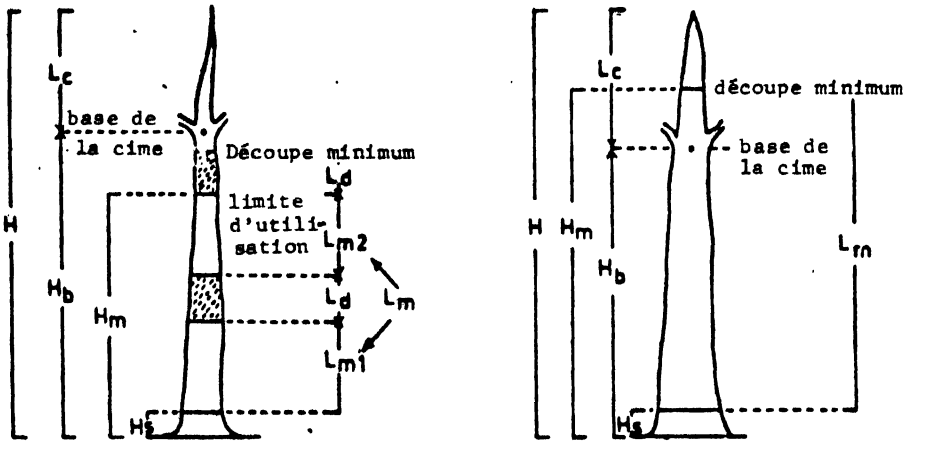
Si l'on doit corriger, à une phase ultérieure de l'inventaire, l'identification des essences faite lors du comptage, on essayera de déterminer la cause des erreurs. Afin d'obtenir des données homogènes dans toutes les unités d'inventaire, il est préférable d'éviter ces corrections dans les unités où le comptage est déjà commencé à moins de le reprendre entièrement.

24 Mesures

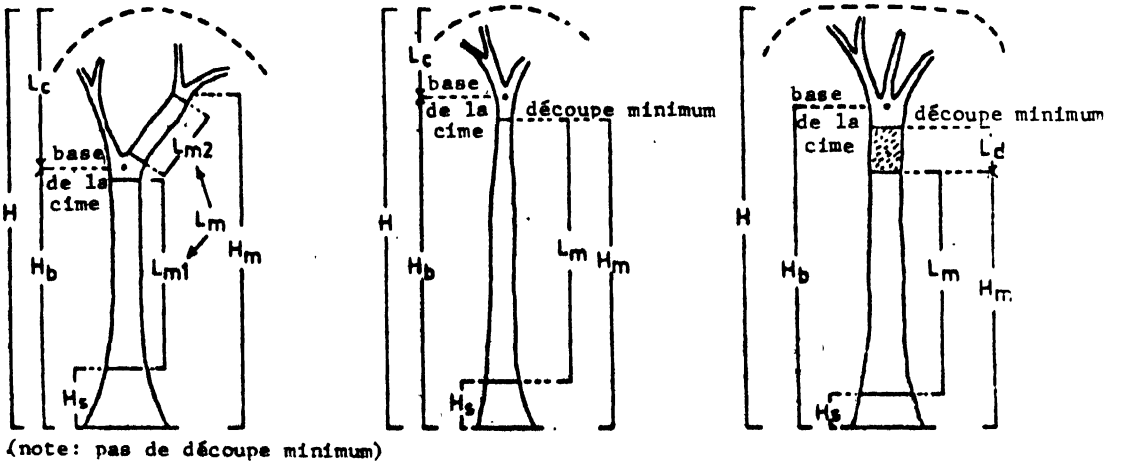
L'estimation des volumes des arbres de l'échantillon et du peuplement se fait en mesurant des caractéristiques de ces arbres telles que: le diamètre - à hauteur d'homme ou à tout autre niveau de la tige, ou des branches (sur des arbres abattus); la hauteur jusqu'à un certain niveau du fût, ou la longueur du fût ou des branches et l'épaisseur de l'écorce - en général à hauteur d'homme pour les arbres sur pied. Les mesures sont faites soit sur les arbres sur pied, soit sur les arbres abattus en particulier dans le cas de la construction de tarifs de cubage.

Figure V- 1 Classification des hauteurs et des longueurs de fût

a. Forme droite



b. Forme ramifiée



(note: pas de découpe minimum)

241 Unités de mesure. On recommande vivement d'utiliser le système métrique car il est le plus pratique et la plupart des pays l'ont adopté ou pensent l'adopter dans un avenir proche. Le système métrique permet de transformer plus facilement les mesures linéaires en poids ou en volume. Le diamètre est en général exprimé en centimètres ou parfois en mètres. La hauteur et la longueur sont presque toujours données en mètres et l'épaisseur de l'écorce en millimètres. L'accroissement du diamètre est donné en centimètres ou millimètres.

Dans les pays, où le système anglo-saxon est utilisé, il est conseillé de convertir en unités métriques les résultats obtenus directement à partir de mesures linéaires, de même que pour les unités de volume.

242 Classes de mesure

242.1 On pourrait imaginer de faire les mesures avec une précision voisine de la plus petite unité repérable ou d'une partie de cette unité. Cela ne serait pas réaliste car, dans un inventaire forestier, les erreurs de mesure sont souvent supérieures. Comme cette précision entraînerait des dépenses supplémentaires, de nombreuses mesures – à l'exception des mesures d'écorce et d'accroissement du diamètre – sont réalisées par classes.

L'amplitude des classes à utiliser pour la mesure de hauteur, de diamètre et de longueur est déterminée par les facteurs suivants:

- appareils et procédés utilisés pour faire ces mesures;

- conditions du milieu telles que visibilité et forme des arbres.

- compétence et entraînement des équipes;

- homogénéité et comparabilité des données d'un inventaire à l'autre.

Sur ce dernier point, on peut faire les remarques suivantes:

a) l'amplitude des classes de diamètre est en général, dans le système métrique, de 5 ou 10 cm. Les diamètres minimums seront des multiples de 2,5 cm. Cependant, comme le diamètre minimum varie (5 cm, 7,5 cm, 10 cm, 15 cm), il n'est pas toujours facile de comparer les différents inventaires;

b) lorsqu'on utilise le système anglo-saxon, on devrait essayer d'utiliser des limites de classes qui soient peu différentes des limites de classes du système métrique. Cela implique l'utilisation de classes de diamètre de 2 ou 4 inches et de classes de longueur ou de hauteur de 5 à 10 pieds. Le tableau ci-dessous donne les limites recommandées des classes minimums pour les inventaires de la FAO, dans les systèmes métrique et anglo-saxon;

c) lorsque les utilisateurs ne s'intéressent qu'aux estimations de volumes on utilisera des classes de surface terrière d'amplitude égale plutôt que des classes de diamètre. Les estimations de volumes obtenues par tarif de cubage sont plus valables statistiquement lorsqu'elles sont obtenues par un comptage avec classes de surface terrière plutôt qu'avec classes de diamètre. Dans un inventaire en forêt feuillue tropicale hétérogène on peut par exemple utiliser des classes de surface terrière pour les arbres de diamètre supérieur au minimum exploitable (estimation des volumes au-dessus de ce diamètre), et des classes de diamètre pour les arbres inférieurs à ce diamètre. En effet, les effectifs par classes de diamètre sont plus utiles pour l'aménagement que les volumes. Un tel système peut être appliqué dans la mesure où l'on pourra comparer les inventaires, par exemple lorsqu'on cherche seulement les volumes au-dessus du diamètre minimum exploitable.

Limites des classes minimums de diamètre et de hauteur recommandées pour les calculs et les résultats d'inventaires

Diamètre

Système métrique cm	Equivalent approx. en système anglo-saxon inches	Equivalent réels en cm
0 - 5	0 - 2	0.00 - 5.08
5 - 10	2 - 4	5.08 - 10.16
10 - 15	4 - 6	10.16 - 15.24
15 - 20	6 - 8	15.24 - 20.32
20 - 25	8 - 10	20.32 - 25.40
25 - 30	10 - 12	25.40 - 30.48
etc.	etc.	etc.

Hauteur

Système métrique cm	Equivalent approx. en système anglo-saxon feet	Equivalents réels en cm
0 - 3 { 0.0 - 0.3	0 - 10 { 0 - 1	0.0 - 3.048 { 0.0 - 0.305
0.3 - 1.5	1 - 5	0.305 - 1.524
1.5 - 3.0	5 - 10	1.524 - 3.048
3 - 6	10 - 20	3.048 - 6.096
6 - 9	20 - 30	6.096 - 9.144
9 - 12	30 - 40	9.144 - 12.192
12 - 15	40 - 50	12.192 - 15.240
15 - 18	50 - 60	15.240 - 18.288
18 - 21	60 - 70	18.288 - 21.336
21 - 24	70 - 80	21.336 - 24.384
24 - 27	80 - 90	24.384 - 27.432
27 - 30	90 - 100	27.432 - 30.480
30 - 40	100 - 150	30.48 - 39.62
40 - 50	130 - 160	39.62 - 48.77
50 - 60	160 - 190	48.77 - 57.91
etc.		

242.2 La précision des résultats d'inventaire dépend naturellement du groupement en classes des données de base. Plus les classes seront grandes plus les erreurs correspondantes seront significatives. Ce type d'erreur est étudié en détail dans Forest Inventory par Loetsch, Zöhrer et Haller (volume II pages 85 à 90). Cette analyse peut se résumer de la manière suivante:

- cette erreur a deux composantes:

- une composante systématique (le biais qui provient de la différence pour chaque classe de diamètre ou de surface terrière entre la moyenne réelle et la valeur médiane. Cette différence provient de la distribution des diamètres à l'intérieur de la classe de diamètre;

- une composante aléatoire qui provient du fait que dans un inventaire forestier on ne mesure qu'un échantillon d'arbres d'une classe de diamètre donnée et l'estimation du diamètre moyen de cette classe (et de la surface terrière moyenne) contient une erreur d'échantillonnage. (L'estimation du diamètre moyen de la classe de l'échantillon n'est en général pas égale au diamètre réel moyen de cette classe qui est lui-même souvent différent du diamètre médian - voir plus haut).

Il est difficile de tenir compte de ce type d'erreur dans le calcul de l'erreur sur les résultats. La meilleure solution est d'utiliser des petites classes, car l'erreur augmente en fonction de l'amplitude des classes, et de considérer que les erreurs correspondantes sont négligeables.

243 Appareils et méthodes de mesure. Sans chercher à décrire et faire une analyse critique des divers appareils utilisés pour mesurer le diamètre, la hauteur, la longueur et l'épaisseur de l'écorce, on donnera ici quelques indications sur les méthodes de mesure qui concernent plus particulièrement les inventaires des forêts tropicales hétérogènes. Le lecteur trouvera des renseignements plus complets dans des publications sur la dendrométrie et les inventaires et dans les notices des fabricants.

243.1 Mesures du diamètre

243.11 Diamètre à hauteur d'homme

Pour des raisons de commodité, les compas sont peu utilisés dans les inventaires en forêts tropicales. La dimension des arbres, la présence de contreforts développés et de racines aériennes y rendent en effet leur emploi difficile.

Les rubans sont utilisés pour les arbres abattus et pour les arbres sur pied dont les contreforts ont moins de 2 mètres de haut environ. On peut faire les remarques suivantes sur l'utilisation de ces rubans en inventaire forestier tropical:

- les rubans en fibre de verre sont souvent les plus commodes;

- la présence d'un crochet fixé au zéro du ruban permet à une personne seule de mesurer les gros arbres;

- pour les gros arbres, le ruban risque de dévier par rapport à l'horizontale, ou d'être lâche. On doit donc prendre soin de bien le tendre dans le plan horizontal de mesure;

- il y a souvent des lianes accrochées à la tige; il faut les couper au niveau de la mesure, ou bien glisser le ruban par dessous si cela est possible;

- on devra indiquer les graduations de diamètre en unités de longueur (centimètres ou inches) ou les limites de classes de diamètre sur une face du ruban. Il est préférable d'utiliser des rubans qui ont une face vierge sur laquelle on pourra indiquer les limites des classes de diamètre adoptées.

Pour les arbres dont le ''diamètre à hauteur d'homme'' est plus haut que 2 mètres on devra utiliser des appareils et méthodes permettant de mesurer les diamètres à des niveaux supérieurs.

243.12 Autres diamètres

De nombreux instruments plus ou moins perfectionnés et précis ont été conçus pour mesurer les diamètres à différentes hauteurs de la bille. Les plus simples ne sont pas nécessairement les moins précis et la manière dont ils sont utilisés (et donc la formation du personnel) est primordiale.

Lorsque la hauteur de référence est relativement faible (mesure des diamètres au-dessus des contreforts), une simple règle graduée, située au bout d'une tige métallique ou en bois, que l'on pose contre la bille face à l'observateur, en faisant coïncider le zéro avec un côté de la bille, est suffisante pour faire une mesure par classe de diamètre. Comme l'observateur dans une forêt tropicale ne peut se placer très loin de l'arbre (en général pas plus de 15 mètres), l'erreur de parallaxe n'est pas négligeable. On devra donc, pour en tenir compte, corriger les graduations de la règle pour une distance horizontale donnée entre l'observateur et l'arbre. Cette méthode simple a été utilisée dans de nombreux inventaires forestiers en Afrique occidentale. Le compas Finlandais ainsi que d'autres appareils construits sur le principe du bâton de Biltmore peuvent aussi être utilisés pour mesurer les diamètres au-dessus des contreforts ou à des hauteurs assez faibles.

Les appareils de mesure des diamètres à différentes hauteurs sont plus perfectionnés et plus onéreux. Les plus intéressants sont indiqués ci-dessous, par ordre croissant de perfectionnement:

- le ''pentaprisme de Wheeler'' est formé d'un tube métallique à section carrée portant un prisme fixe et un prisme coulissant. La distance entre les deux prismes est égale au diamètre mesuré. Le seul inconvénient de cet appareil simple et précis est que le tube doit être aussi long que le plus grand diamètre à mesurer ce qui fait qu'il ne peut être utilisé pour les plus grands arbres des inventaires tropicaux;

- les appareils tels que le ''Diatromb'' dans lequel deux index sont mis en coïncidence optiquement avec les bords de la tige et sont à une distance horizontale fixe de l'oeil de l'observateur (les index sont fixés à une barre coulissant sur une tige, la distance entre l'oeil qui se trouve à une extrémité de la règle et cette barre est telle que sa projection horizontale est constante);

- le relascope de Bitterlich qui peut être utilisé à plusieurs fins permet la mesure simultanée d'une hauteur et du diamètre de la tige à cette hauteur. Le relascope à bandes larges est utilisé couramment pour mesurer les diamètres supérieurs dans les forêts tropicales, bien que la visibilité dans ces forêts ne soit pas toujours suffisante pour permettre des mesures précises;

- le dendromètre Barr et Stroud a un système optique grossissant. Il utilise le principe de la coïncidence décalée et est très précis mais assez onéreux.

243.2 Mesures de hauteur

On réalise ces mesures:

a) sur tous les arbres de l'échantillon (ou une partie de ceux-ci seulement) parallèlement aux mesures des diamètres supérieurs, lorsque le volume des arbres sur pied de l'échantillon est calculé à partir de formules qui utilisent ces données;

b) sur tous les arbres de l'échantillon (ou une partie de ceux-ci seulement), en plus du diamètre à hauteur d'homme, lorsque le volume des arbres de l'échantillon est calculé à partir de tarifs mathématiques ayant comme paramètres indépendants le diamètre et la hauteur;

c) sur un sous-échantillon assez petit d'arbres, en même temps que les mesures des diamètres de la tige supérieure, quand le volume de ces arbres est calculé à partir de formules géométriques et que le volume, le diamètre à hauteur d'homme et la hauteur, sont utilisés pour calculer, par régression, des tarifs de cubage.

Les mesures de hauteur, comme les mesures de diamètre de la tige supérieure, sont des mesures indirectes, donc longues, réalisées avec des instruments optiques (contrairement au diamètre à hauteur d'homme qui est généralement une mesure directe et rapide). En choisissant la méthode de calcul des volumes pour un inventaire forestier, on devra vérifier si ces mesures supplémentaires sur tous les arbres de l'échantillon (ou sur une partie représentative de celui-ci) sont justifiées. Dans de nombreux inventaires de feuillus tropicaux hétérogènes, il s'est avéré plus intéressant d'utiliser des ''tarifs de cubage à une entrée'' par essences, en mesurant seulement le diamètre à hauteur d'homme sur tous les arbres de l'échantillon, que d'employer des tarifs de cubage ayant comme paramètres indépendants le diamètre et la hauteur, en mesurant ceux-ci sur les arbres des unités du sondage; le gain en précision est faible en regard de l'augmentation du coût du comptage (voir ci-dessus paragraphe 342.2).

Comme pour la mesure des diamètres de la tige supérieure, de nombreux appareils existent. Les moins coûteux et les moins perfectionnés peuvent s'avérer très utiles dans certaines conditions et notamment dans certains inventaires forestiers tropicaux. Des mesures directes à l'aide de tiges télescopiques ne sont possibles que pour de faibles hauteurs. Pour des hauteurs plus importantes (hauteur totale, hauteur du fût, hauteur marchande des arbres courants) on doit faire des mesures indirectes à l'aide de dendromètres. Le dendromètre de Christen est un instrument maniable et très bon marché que l'on conseille pour les inventaires forestiers tropicaux dans lesquels la précision demandée n'est pas très importante. D'autres dendromètres, bien connus, tels que les dendromètres Blume Leiss ou Haga sont plus précis mais les mesures demandent plus de temps et nécessitent parfois une distance trop importante entre l'observateur et l'arbre, eu égard à l'opacité du sous-bois. On peut aussi utiliser des clisimètres tels que le clisimètre Suunto mais on ne peut lire directement les hauteurs, que l'on doit calculer à partir des pentes mesurées par l'instrument. On utilise le relascope de Bitterlich pour mesurer les hauteurs en même temps que les diamètres de la tige supérieure.

243.3 Mesure de l'écorce

Tous les diamètres ''à hauteur d'homme'' ou à un niveau supérieur de la tige sont mesurés sur écorce sur les arbres sur pied. Or le volume commercial ne comprend pas l'écorce. Le problème est donc de trouver un rapport entre le volume sous écorce d'une part et le diamètre sur écorce, et peut-être aussi l'épaisseur de l'écorce, d'autre part.

Si l'on estime le volume des arbres sur pied de l'échantillon sans utiliser des tarifs de cubage, on devra estimer les volumes sous-écorce à partir des volumes sur écorce en utilisant un coefficient calculé à partir de la mesure de l'écorce à hauteur d'homme.

Si les tarifs de cubage sont utilisés et calculés à partir d'un échantillon d'arbres abattus, la meilleure solution est d'estimer les volumes sous écorce de ces arbres échantillons et d'exprimer ces volumes, par analyse de régression, en fonction du diamètre à hauteur d'homme sur écorce (ou de la hauteur et de diamètres sur écorce à d'autres niveaux). Dans ce cas, l'épaisseur de l'écorce est mesurée à l'aide d'une jauge sur les faces des billes des arbres échantillons.

Les jauges les plus couramment employées pour mesurer l'épaisseur de l'écorce à hauteur d'homme sont de conception suédoise. Les risques de sous-estimer ou de surestimer l'épaisseur de l'écorce sont nombreux et il faut un personnel soigneux et qualifié pour realiser ces mesures.

3 Estimation des volumes

31 Définition des volumes

Il est capital dans un inventaire de définir, clairement et objectivement, le volume auquel on se réfère. De trop nombreux documents d'inventaire ne définissent pas clairement le diamètre à hauteur d'homme minimum, les parties des arbres qui sont prises en considération (compte-t-on les branches? quel est le diamètre minimum au fin bout?), tient-on compte du volume de l'écorce, s'agit-il de volumes bruts? ou les parties défectueuses sont-elles exclues? quels sont les critères qui déterminent les défauts? les volumes ''nets'' ou ''utilisables'' correspondent-ils à ce qu'on pourra exploiter, ou comprennent-ils les pertes à l'exploitation? etc. On comprend très bien pourquoi la définition à l'aide d'un adjectif tel que ''brut'', ''net'', ''industriel'' est, en général, insuffisante, et pourquoi elle doit être mieux explicitée.

Une définition insuffisante, incomplète ou imprécise entraîne de graves inconvénients. Lorsque, par exemple, on utilise les résultats d'inventaire pour une étude de pré-investissement, on peut fausser toute l'étude par une mauvaise interprétation de la notion de volume. Cela se produit, en particulier, lorsque les volumes, insuffisamment définis, sont considérés comme des volumes exploitables alors que ce sont des volumes ''bruts'' ou ''nets'' qui comprennent les pertes à l'exploitation.

Les définitions suivantes, données dans la première édition de ce Manuel, sont les définitions standard recommandées pour tous les inventaires forestiers de la FAO:

Volume brut: volume sous écorce d'une partie déterminée d'un arbre sans déduction pour les défauts 1/. Lorsqu'on utilisera ce terme, il faudra préciser la partie de l'arbre auquel il se réfère, par exemple: volume brut total de l'arbre 2/.

Volume net: volume sous écorce d'une partie déterminée d'un arbre, après déduction des défauts et des parties inutilisables. On devra aussi préciser à quelles parties de l'arbre il se rapporte.

Volume total: volume de la tige principale d'un arbre. Dans le cas des arbres ramifiés, c'est le volume jusqu'à la base de la cime. Dans le cas des arbres droits c'est le volume jusqu'au sommet de l'arbre.

Volume des branches: dans le cas des arbres droits, c'est le volume de toutes les branches. Dans le cas des arbres ramifiés, c'est le volume au-dessus de la base de la cime (et de toutes les branches qui s'insèrent en deçà de ce point).

Volume industriel 3/: le volume net bois rond, potentiellement utilisable, sans déduction des pertes résultant des modes d'exploitation et de transformation. C'est la du volume des billes et de tous les autres volumes utiles.

Volume des billes: le volume net d'un arbre utilisable comme bois de placage, sciage, traverse, pieux et poteaux. Il peut aussi être utilisé pour la pâte à papier, les copeaux ou à d'autres fins industrielles.

Autres volume utilisable: le volume net d'un arbre qui ne convient pas aux usages indiqués pour le volume des billes mais qui peut être utilisé pour les piquets, la pâte, les panneaux agglomérés et autres usages industriels.

1/ Dans de nombreux inventaires le volume brut s'entend sur écorce.

2/ Le volume brut, comme les autres volumes, se rapporte au diamètre à hauteur d'homme minimum des arbres considérés et à la découpe minimum de la tige et des branches.

3/ Cette notion correspond au volume brut de bois d'oeuvre et d'industrie.

On peut faire les remarques suivantes pour compléter ces définitions:

a) Les termes ''marchand'' ou ''commercial'' qualifiant le volume ''industriel'', ''le volume des billes'' ou ''autre volume utilisable'' ou bien des parties déterminées de ces volumes, désignent le volume qui peut être exploité avec profit sous certaines conditions.

b) Pour estimer les volumes marchands et commercialisables, il est nécessaire de connaître, pour une essence donnée ou un groupe d'essences, dans certaines conditions d'exploitation et pour la zone inventoriée ou une zone voisine semblable, les spécifications commerciales en vigueur au moment de l'inventaire (correspondant à ce que l'on sait de l'utilisation du bois, et des marchés). Pour évaluer le volume marchand, il faut en général compléter les opérations d'inventaire proprement dites en mesurant, dans les chantiers d'exploitation, les billes enlevées et les pertes pour déterminer le rapport entre le volume marchand enlevé et le volume donné par l'inventaire. Ceci est particulièrement vrai dans des inventaires de forêts tropicales hétérogènes où il n'y a pas de tradition d'exploitation et où le marché et l'infrastructure évoluent rapidement. Les volumes ''marchands'' sont des résultats d'inventaire qui ne peuvent être donnés qu'après des études de récolement. Si ce n'est pas le cas, l'adjectif ''marchand'' n'est pas approprié.

c) On ne devrait, en aucun cas, utiliser l'expression ''volumes nets'' comme synonyme de ''volumes marchands''. La seule évaluation qualitative (ou classification) des arbres sur pied de l'échantillon ne peut donner une estimation valable du volume marchand qui dépend des défauts internes, des pertes à l'exploitation (fentes, cassures, etc.), et d'autres facteurs qui ne peuvent être prévus par l'observation des arbres de l'échantillon. Il est utile de sonder les arbres à hauteur de poitrine pour évaluer la pourriture (voir paragraphe 42 ci-dessous) de façon à estimer l'état sanitaire des bois. Cela donne aussi des renseignements sur la qualité des arbres sur pied, mais il importe de réaliser que d'autres paramètres sont nécessaires pour évaluer correctement le volume marchand.

d) Il ne semble guère utile d'évaluer les ''volumes nets'' car c'est en général le volume marchand qu'il importe surtout de déterminer. Cela est d'autant plus vrai que les biais subjectifs sont presque inévitables dans l'évaluation des volumes nets. Dans de nombreux inventaires forestiers tropicaux, on pourra employer les procédés suivants:

1. utiliser les mesures d'inventaire, à l'exclusion des données de base sur la qualité des bois, pour déterminer objectivement les volumes bruts sur pied;

2. utiliser les données de base sur la qualité pour classifier (ou ''stratifier''), ces volumes bruts en classes de qualité. Ces données sont obtenues par l'observation des défauts externes, par la détection des pourritures à hauteur d'homme et éventuellement par une analyse qualitative d'un sous-échantillon d'arbres abattus;

3. faire une étude de récolement sur un échantillon d'unités d'exploitation. On obtiendra ainsi des coefficients de rendement partiels pour chacune des classes de qualité déterminées précédemment.

32 Unités de volume

Les volumes peuvent être exprimés en unités cubiques se rapportant au volume total de l'arbre (ou d'une partie déterminée de celui-ci) ou bien en unités se rapportant à la quantité finale de produit qui peut être obtenu à partir de l'arbre ou d'une partie de celui-ci. Le board foot nord-américain (qui vaut 0,00236 m^3) est un exemple de volume final. Ce dernier type d'unités a l'avantage d'exprimer directement la quantité finale de produits obtenue, ce qui facilite l'évaluation. Cependant, il a de graves inconvénients car il exprime le rendement en fonction d'un seul produit, sciages ou débits, alors que pour les grumes de sciage ce volume dépend des défauts de la bille, de l'habileté du scieur, de l'épaisseur de la bille sciée et de la décroissance. Dans les inventaires forestiers tropicaux on se contente généralement, par convention tacite, d'estimer le volume à la sortie du parterre de coupe ou quelquefois à l'entrée dans les parcs à bois des usines. Pour ces raisons et pour d'autres, il semble logique d'adopter ce système et de ne plus estimer les volumes en fonction des produits finis. On donnera en plus les résultats en unités ''board foot'' si cela paraît essentiel.

Comme pour les mesures linéaires (voir plus haut paragraphe 241) l'emploi du système métrique (mètre cube comme unité de volume) est hautement recommandé. Dans les pays où le système anglo-saxon est encore utilisé, il peut être intéressant de donner les résultats à la fois en pieds cubes et en mètres cubes; beaucoup de ces pays envisagent de se convertir au système métrique dans un proche avenir et les statistiques internationales sur les ressources en bois en seront grandement facilitées. L'emploi du système métrique, et des deux systèmes en même temps pour les pays qui utilisent le système anglo-saxon, est recommandé pour tous les inventaires forestiers réalisés par la FAO.

33 Classification des techniques d'estimation du volume

Les valeurs des paramètres mesurées et relevées dans l'échantillon servent à estimer les moyennes et les totaux de ces paramètres ou d'autres caractéristiques de la forêt inventoriée (ou de parties de celle-ci). Les volumes moyens et totaux sont les principales estimations à obtenir lors de l'inventaire.

Toutes les observations faites dans les unités d'échantillonnage pour estimer le volume portent sur des arbres. Dans la première étape de l'estimation du volume, on utilise ces observations, soit pour calculer les volumes des arbres dans les unités d'échantillonnage, (et donc les volumes correspondants du peuplement dans les unités d'échantillonnage), soit pour estimer directement les caractéristiques du peuplement dans les unités d'échantillonnage. Un exemple de ce dernier cas est le tour d'horizon réalisé à l'aide du relascope Bitterlich à partir d'un point dans une plantation. L'unité d'échantillonnage est le point et la caractéristique du peuplement est sa surface terrière en ce point. Les observations élémentaires sont réalisées sur les arbres autour de ce point mais les volumes unitaires des arbres ne sont pas (et ne peuvent pas) être estimés par cette simple observation.

L'estimation des volumes des arbres dans le premier cas, ou l'estimation directe du volume du peuplement en chaque unité dans le deuxième cas peuvent se faire de la manière suivante:

- soit en utilisant des formules (telles que les formules géométriques pour le calcul du volume des solides simples) et des procédés graphiques à condition que l'on fasse des mesures suffisamment détaillées;

- soit en utilisant des relations quantitatives entre les quelques 1/ paramètres mesurés et les volumes, telles que les tarifs de cubage calculés par régression.

On peut ainsi classer les techniques d'estimation des volumes comme suit:

1. estimations du volume (à partir) des arbres
   11. sans relations quantitatives
   12. avec relations quantitatives

2. estimations du volume directement au niveau des peuplements
   21. sans relations quantitatives
   22. avec relations quantitatives

L'expression ''relations quantitatives'' signifie relations déduites des autres arbres ou peuplements 2/ et elle a des applications restreintes: les tarifs de cubage sont, en général, valables pour une région donnée, pour une qualité de station donnée, pour une essence ou un groupe d'essences donnés, et, parfois, pour une classe de diamètre donnée, etc. (Les principes de cette classification sont tirés du livre ''Préparation d'un inventaire forestier'' par B. Husch, mais l'ordre de leur présentation est différent).

1/ Dans la plupart des cas, pour estimer les volumes des arbres, les seuls paramètres envisagés sont le diamètre à hauteur d'homme et la hauteur (totale, marchande, etc.).

2/ Ces arbres ou peuplements doivent, en principe, appartenir à la population inventoriée.

On se bornera ci-dessous à étudier l'estimation du volume (à partir) des arbres car ce type d'estimation est le plus utilisé dans les inventaires forestiers, notamment sous les tropiques où la plupart des peuplements sont mélangés et irréguliers.

34 Estimation du volume des arbres

341 Formules géométriques utilisées pour des arbres sur pied ou abattus. Le volume total d'une tige (ou son volume jusqu'à la découpe minimum) est donné par la formule bien connue:

$$V = f.g.h.$$

où f, g et h sont respectivement le coefficient de forme, la surface terrière à hauteur d'homme (ou au-dessus des contreforts) et la hauteur de la tige (à partir de la base ou à partir des contreforts), totale ou jusqu'à une découpe minimum.

S'il est en général possible de déterminer la surface terrière à hauteur d'homme et la hauteur avec une bonne précision, cela n'est pas le cas pour le coefficient de forme car la forme de la tige n'est pas facile à déterminer et elle peut ne pas être uniforme pour toute la tige. Si l'on veut de plus inclure le volume des branches, le rapport du volume par le produit surface terrière x hauteur sera encore plus difficile à déterminer.

La manière la plus évidente pour déterminer le(s) volume(s) d'un arbre est de le diviser (avec un instrument optique s'il est sur pied) en sections de longueurs égales ou inégales (billons ou ''tronçons'' de la tige, branches dans certains cas), d'estimer le volume de ces parties par des formules géométriques et de faire la somme de ces volumes. Les formules géométriques qui donnent le volume d'une bille à partir de sa longueur et de ses diamètres à chaque bout et/ou au milieu ne peuvent donner des résultats exacts car un billon ne ressemble jamais parfaitement à un solide géométrique simple. Cependant, leur exactitude est suffisante par rapport aux erreurs de mesure et cela est d'autant plus vrai que les sections sont plus nombreuses.

Les formules géométriques courantes sont:

- la formule de Smalian: $v = \frac{g_b + g_u}{2} L$
- la formule d'Huber: $v = g_m L$
- la formule de Newton: $v = \frac{g_b + 4g_m + g_u}{6} L$

où v est le volume de la bille

g_b est la surface de la section ou gros bout: $g_b = \frac{\pi}{4} d_b^2$

g_m est la surface de la section au milieu: $g_m = \frac{\pi}{4} d_m^2$

g_u est la surface de la section au fin bout: $g_u = \frac{\pi}{4} d_u^2$

L est la longueur de la bille

(Les volumes considérés peuvent être des volumes sur écorce ou sous écorce mais, dans ce dernier cas, les diamètres d_b, d_m, d_u doivent être mesurés sous écorce).

Ces trois formules sont valables si l'on peut assimiler la bille à une partie d'un paraboloïde de révolution. La formule de Newton s'applique si la bille est, approximativement, un tronc de cône ou de néloïde. Dans ces deux derniers cas, la formule d'Huber sous-estime le volume alors que la formule de Smalian donne une surestimation qui est deux fois plus grande que la sous-estimation de la formule d'Huber.

Il est recommandé d'utiliser la formule de Newton lorsque les billons sont longs, (à savoir, lorsque le nombre de billons par arbre est petit et, bien sûr, quand on envisage la tige tout entière). Cela implique que, pour estimer le volume d'une tige jusqu'à une découpe minimale connue, on devra faire au moins deux mesures de diamètre - à la base ou au-dessus des contreforts et au milieu, entre la base et la découpe minimale - et une mesure de la hauteur (de la base à cette découpe).

Il y a trois façons courantes de partager le fût :

- on le divise en billons de longueur égale à partir de la base et on assimile souvent le dernier billon à une fraction simple de cette longueur unitaire. Ce procédé est le plus courant dans les inventaires forestiers;

- on le divise en billons de telle sorte que la différence entre les diamètres aux deux bouts soit constante: les billons n'ont alors, en général, pas la même longueur à moins que l'arbre ne soit conique;

- on le divise en billons de longueurs inégales en utilisant les mesures à hauteur d'homme: dans un inventaire forestier national européen, les diamètres suivants sont mesurés sur tous les arbres de l'échantillon: diamètre de base, diamètre à hauteur d'homme (1,30 m), diamètre à 2,60 m, diamètre à la hauteur commerciale (ou découpe minimum) et diamètre au point médian entre 2,60 m et la hauteur commerciale. On calcule alors le volume de l'arbre par la formule de Newton appliquée à chacun des deux billons, le billon inférieur ayant environ 2,6 m de long et l'autre allant de 2,60 m à la découpe minimale.

Les appareils utilisés pour mesurer le diamètre et la hauteur de la tige supérieure en vue du cubage des arbres sur pied sont présentés brièvement au paragraphe 243. Les relascopes de Bitterlich avec trépied sont très utiles pour mesurer, simultanément, les diamètres et les longueurs des différents billons. Les volumes des arbres échantillons sur pied, utilisés pour l'établissement des tarifs de cubage dans les inventaires forestiers tropicaux, sont souvent calculés à partir de mesures d'arbres sur pied faites avec le relascope, lorsque l'abattage des arbres n'est pas possible.

342 Tarifs de cubage mathématiques

342.1 Introduction

Dans toutes les pages qui suivent, l'expression ''tarif de cubage'' doit s'entendre au sens restreint de ''tarifs de cubage mathématiques'' établis à partir d'équations (ou formules) qui donnent le volume d'un arbre (''variable dépendante'') en fonction de certaines de ses caractéristiques (notamment diamètre à hauteur d'homme et hauteur) et qui dérivent d'analyses statistiques de régression. (Au sens large habituellement admis, l'expression tarifs de cubage désigne non seulement les tarifs tirés de ce type d'équation mais aussi ceux qui étaient autrefois établis et qui le sont, parfois, encore par des méthodes graphiques ou ''semi-graphiques'' telles que la méthode de Keen et Page et qui ne devraient plus être utilisés, car ils comprennent un biais humain et ne permettent pas l'estimation précise de l'erreur statistique).

L'avantage d'utiliser les tarifs de cubage mathématiques en inventaire forestier est évident. Ils permettent à partir de la mesure d'un nombre limité d'arbres, judicieusement choisis à l'intérieur de la zone, (''arbres échantillons''), d'estimer objectivement le volume d'un plus grand nombre d'arbres dans les unités d'échantillonnage et par là les volumes moyens et totaux de la zone inventoriée.

L'établissement de ces tarifs de cubage est difficile, long et coûteux. Dès que l'on décide d'estimer le volume des arbres de l'échantillon à l'aide de ces tarifs (et non par d'autres mesures), on a une tendance injustifiée à réduire le travail concernant l'établissement de ces tarifs. Il peut arriver, par exemple, que des tarifs soient déjà disponibles et

que l'on n'éprouve pas le besoin de les adapter ou d'en faire d'autres. Il est cependant capital de vérifier qu'ils sont valables et utilisables dans le cas particulier de l'inventaire. On donnera, au paragraphe 342.4 quelques indications sur la validité statistique des tarifs de cubage. Avant de les utiliser pour un inventaire donné, il est nécessaire de vérifier si la forme des arbres dans la forêt inventoriée est la même que dans celle où ces tarifs ont été calculés (dans le cas de tarifs dont les variables indépendantes sont le diamètre et la hauteur); si la hauteur moyenne par classe de diamètre d'une essence donnée est la même dans les deux régions (dans le cas de tarifs à une entrée pour une essence, où la variable indépendante est le diamètre à hauteur d'homme); si la composition par essences des deux zones est semblable lorsque le tarif est utilisé pour les arbres de toutes les essences; dans le cas où les tarifs de cubage à une entrée sont rapportés à des groupes d'essences, si la représentation de chaque essence dans le groupe est la même dans les deux zones. etc.

Pour vérifier, objectivement, si ces tarifs de cubage sont utilisables, il est conseillé de faire un contrôle sur le terrain. On peut le faire en déterminant, directement, le volume d'un nombre d'arbres judicieusement choisis dans la forêt à inventorier, en utilisant les mêmes méthodes et les mêmes mesures que pour le calcul des tarifs. On détermine aussi les volumes de ces arbres à partir des tarifs. Le pourcentage de l'écart entre les deux résultats est ensuite calculé. Ces pourcentages peuvent être mis sous forme de tableaux et on peut établir des moyennes par classes de diamètre (et éventuellement aussi de hauteur) pour les mêmes essences ou groupes d'essences. S'il y a une différence significative entre le volume mesuré et le volume calculé, on ne pourra pas utiliser les tarifs, tout au moins pas sans correction.

L'emploi de tarifs de cubage inapplicables ou erronés, qu'ils aient été élaborés spécialement ou non, peut compromettre sérieusement la valeur des résultats, et cela d'autant plus que l'erreur d'échantillonnage due à l'échantillonnage lui-même sera faible: dans ce cas, une grande partie de l'erreur totale (y compris les erreurs de mesure) peut être due à l'utilisation de ces tarifs.

Les méthodes pour estimer le volume à l'aide de tarifs de cubage sont des méthodes statistiques. Certaines d'entre elles - la méthode des moindres carrés, en particulier, mais aussi d'autres méthodes d'analyse à plusieurs variables ''non paramétriques'' et la classification automatique - se bornent à un calcul mathématique pur et elles sont utilisées pour établir les tarifs. L'analyse de régression sert au contraire à appliquer le tarif aux arbres des unités d'échantillonnage et ne peut donc pas être utilisée sans restriction. Il est donc toujours possible d'établir une relation statistique entre le volume et une caractéristique des arbres échantillons, à l'aide d'une méthode mathématique. Cependant, si nous voulons connaître l'erreur statistique qui correspond à l'application de ce tarif à un arbre ou à un groupe d'arbres du peuplement, certaines conditions, que nous étudierons au paragraphe 342.4, devront être remplies.

342.2 Types de tarifs de cubage

La caractéristique la plus significative auquelle se reporte le(s) volume(s) d'un arbre est le diamètre à hauteur d'homme (d). Aussi, tous les tarifs de cubage auront, comme variable indépendante $\underline{d}$ ou des puissances ou des fonctions de $\underline{d}$ à quoi s'ajoutent très souvent une hauteur, la hauteur totale, la hauteur du fût, ou toute autre sorte de hauteur, ou des puissances ou fonctions de cette hauteur. On introduit en outre dans des tarifs plus compliqués d'autres caractéristiques telles que l'épaisseur de l'écorce ou le coefficient de forme, (rapport entre deux diamètres à différents niveaux de la tige).

On peut donc regrouper les tarifs de cubage dans les catégories suivantes:

a) tarifs à une entrée qui expriment le(s) volume(s) d'un arbre en fonction du diamètre à hauteur d'homme(d) ou de puissances ou de fonctions de d (telles que la surface terrière). Les deux plus couramment utilisées sont:

$$v = a_o + a_1 d^2$$

$$\log v = b_o + b_1 \log d \qquad \text{ou } v = B_o d^{b_1}$$

($B_o = 10^{b_o}$ ou e^{b_o} suivant que le logarithme est décimal ou népérien)

où: d = diamètre à hauteur d'homme

a_o, a_1, b_o, b_1 = constantes

b) tarifs de cubage à deux entrées dont les variables indépendantes sont le d.h.h. et une hauteur donnée, et des fonctions de ces deux caractéristiques. Le tarif a deux entrées le plus courant est de la forme:

$$v = c_o + c_1 d^2 h$$

où: d = diamètre à hauteur d'homme

h = hauteur totale, hauteur du fût ou toute hauteur commerciale ou autre

c_o et c_1 = constantes

c) d'autres tarifs de cubage plus complexes qui ont été développés pour la recherche ou pour des inventaires forestiers nationaux et qui comprennent le diamètre à hauteur d'homme, une ou plusieurs hauteurs et d'autres caractéristiques.

La question est de savoir laquelle de ces catégories de tarifs est à utiliser pour un inventaire forestier donné. Dans de nombreux inventaires forestiers tropicaux, il faut souvent choisir entre des tarifs à une entrée applicables à chaque essence ou groupe d'essences dans tout ou partie de la zone inventoriée, et des tarifs à deux entrées applicables à tous les essences ou groupes d'essences. Il n'y a pas de solution toute faite et chaque cas devra être étudié soigneusement en tenant compte du degré de précision désiré, des coûts respectifs des deux solutions et des problèmes logistiques. Cependant, en considérant ce problème, on peut faire deux remarques:

a) On a découvert que pour une essence ou groupe d'essences donnés de certaines forêts feuillues tropicales hétérogènes (forêts semi-caducifoliées et sempervirentes d'Afrique occidentale) la hauteur moyenne du fût (du haut des contreforts à la base de la couronne) est presque constante dans toutes les classes de diamètre, au-delà d'un certain diamètre (disons 50 cm). Puisque la plupart des volumes intéressants concernent les arbres de diamètre supérieur à ce seuil (qui est, pour de nombreux pays, le diamètre minimum d'exploitabilité), il ne paraît pas capital d'inclure la hauteur du fût dans le tarif de cubage, à condition que dans les unités d'échantillonnage de nombre d'arbres des essences correspondant à chaque classe de diamètre soit assez grand et que la variabilité autour de cette moyenne constante soit relativement faible pour chaque classe de diamètre.

b) L'utilisation d'un tarif à deux entrées implique la mesure d'une hauteur sur chaque arbre, ou au moins une partie d'entre eux, dans chaque unité d'échantillonnage. Le coût supplémentaire qui en découle est significatif car cela peut doubler le temps de comptage ou même plus. D'autre part, la réduction de l'erreur d'échantillonnage découlant de l'utilisation du tarif à deux entrées plutôt qu'à une entrée peut être insignifiante par rapport à l'erreur totale qui comprend aussi l'erreur d'échantillonnage et les erreurs de mesure. Dans ces cas-là, il est plus efficace d'utiliser des tarifs de cubage à une entrée car l'augmentation de l'erreur d'échantillonnage est plus que compensée par la réduction du coût.

342.3 Tarifs de cubage combinés

Dans certains inventaires récents, la procédure d'estimation du volume des arbres n'est pas aussi simple et consiste en une combinaison plus ou moins complexe de tarifs à une et à deux entrées. L'intérêt principal de ce type de procédure est d'éviter de mesurer une deuxième caractéristique (hauteur) pour chaque arbre de l'échantillon tout en réduisant l'erreur d'échantillonnage provenant de l'utilisation des tarifs. On peut envisager de nombreux procédés de ce type et il est impossible d'en donner la liste et de tous les décrire. Les deux exemples suivants donnent une bonne idée de la méthode utilisée.

1er exemple. Tarif de cubage de l'inventaire forestier national PNUD/FAO en Malaisie péninsulaire.

a) Description des mesures effectuées:

- diamètre à hauteur d'homme sur écorce (D_s) et classes de hauteur de 41 200 arbres de l'échantillon;

- diamètre à hauteur d'homme (D_s), diamètre à 16 pieds (D_{16}), diamètre à 32 pieds (D_{32}), diamètre à la base de la couronne (D_c) (tous ces diamètres étant sur écorce) et hauteur du fût (H) de 16 600 arbres sur les 41 200 de l'échantillon (sous-échantillon), pour déterminer à l'aide de formules géométriques le volume V_s de l'arbre sur pied;

- mesures détaillées de 720 arbres abattus sur les 16 600 pour déterminer, avec précision, le volume du fût (V_F);

b) Procédure utilisée

- établissement d'une équation (par la méthode des moindres carrés) entre V_F et V_s, à partir des 720 arbres abattus, V_s est calculé à partir des mesures D_s, D_{16}, D_{32}, D_c et H faites sur les arbres sur pied de l'échantillon:

$$V_F = a + B\ V_s + c\ V_s^2;$$

- application de cette formule aux 16 600 arbres pour déterminer leur V_F (estimé);

- établissement des tarifs de cubage à une entrée (par la méthode des moindres carrés) par essence et classe de hauteur, à partir des 16 600 arbres. Les tarifs sont de la forme:

$$V_F = a'_i + b'_i\ D_s + c'_i\ D_s^2$$ (i variant de 1 au nombre total d'essences x classes de hauteur);

- application de ces tarifs à une entrée aux 41 200 arbres échantillons de l'inventaire pour estimer les volumes de chaque unité d'échantillonnage.

2ème exemple. Tarifs de cubage de l'inventaire PNUD/FAO effectué dans les Aurès en Algérie par l'OTI, Bureau d'études espagnol.

a) Description des mesures effectuées

- dans les unités d'échantillonnage de chaque bloc: mesure sur tous les arbres du diamètre à hauteur d'homme sur écorce, D_s, et mesure de la hauteur totale H sur un sous-échantillon;

- mesures détaillées pour déterminer, avec précision, le volume (V), d'un petit sous-échantillon d'arbres (336 Pinus halepensis et 57 Cedrus).

b) Procédure utilisée

- établissement, à partir du petit sous-échantillon d'arbres et pour chacune des deux essences, d'un tarif de cubage à deux entrées (par la méthode des moindres carrés):

$$V = a + bH + cD_s^2 + dD_s^{2H} \quad \text{pour le Pinus halepensis}$$

$$V = a' + b' D_s^2 H \quad \text{pour le Cedrus}$$

- application de ces tarifs au sous-échantillon d'arbres de chaque bloc pour estimer leur volume V_s;

- établissement de cinq équations (par la méthode des moindres carrés) entre H et D_s, chaque équation correspondant à une strate (qualité de la station):

$$H = a_i'' + b_i'' D_s + c_i'' D_s^2 \quad (i = 1 \text{ à } 5)$$

- affectation de chaque bloc à l'une des cinq strates en utilisant les mesures de hauteur dans le sous-échantillon du bloc;

- établissement d'un tarif de cubage à une entrée par chaque essence et chaque strate entre V_s et D_s, à partir du sous-échantillon des arbres de chaque essence et de tous les blocs de la strate considérée:

$$V_s = a_j''' + b_j''' D_s + c_j''' D_s^2 \quad (j \text{ variant de 1 au nombre total d'essences x classes de strate})$$

- application de ces tarifs à une entrée à tous les arbres de l'échantillon de l'inventaire pour estimer les volumes des unités d'échantillonnage.

Ce type de procédures, illustré par les deux exemples précédents, est généralement considéré comme plus efficace qu'une procédure classique n'utilisant qu'un type de tarif de cubage. Cependant, leur efficacité relative ne peut être évaluée avec précision car la complexité de la procédure rend difficile sinon impossible le calcul de l'erreur d'échantillonnage. Il est de la plus haute importance, comme pour la méthode simplifiée, de vérifier que les conditions d'applicabilité des méthodes statistiques sont remplies à tous les niveaux.

342.4 Aspects statistiques de la construction des tarifs de cubage

Dans de nombreux inventaires forestiers qui utilisent les tarifs de cubage pour estimer le(s) volume(s) des arbres, on ne s'intéresse pas assez aux aspects statistiques et, plus particulièrement, aux conditions statistiques à satisfaire pour avoir des estimations valables des volumes et de l'erreur d'échantillonnage de ces estimations. Jusqu'à maintenant, la littérature forestière est muette sur ce sujet et il serait urgent de faire la lumière sur ces problèmes. Les points suivants ne sont guère que des indications et des recommandations d'ordre général.

Choix des arbres échantillons

La distribution géographique des parcelles dans lesquelles on choisit les arbres échantillons devrait être fondée, soit sur un plan d'échantillonnage systématique ou aléatoire, soit sur un dispositif stratifié systématique ou aléatoire (par formation forestière, par exemple). On décide souvent, pour des raisons logistiques et économiques évidentes, de concentrer les arbres échantillons abattus dans un tout petit nombre d'emplacements dans la forêt à inventorier. Mais il faut bien comprendre que, même si la position de ces grandes parcelles est déterminée objectivement - ce qui doit toujours être le cas -, plus

l'échantillon est concentré, plus l'erreur d'échantillonnage sera grande. Pour les mêmes raisons logistiques et économiques, on choisit souvent les arbres échantillons près des routes ou des clairières. Cela risque de biaiser l'estimation du volume car les arbres n'y poussent pas dans les mêmes conditions qu'en pleine forêt.

Le problème se complique lorsqu'on considère la distribution par essences et/ou par classes de diamètre. Une distribution représentative des arbres échantillons (par exemple, proportionnelle à la répartition des arbres) par essence et/ou par classes de diamètre paraît intuitivement la méthode la plus sûre, sinon la meilleure. On doit cependant tenir compte de certains facteurs avant d'utiliser l'échantillon représentatif. Ainsi, il entraîne une incertitude importante de l'estimation du volume des plus grands arbres car ceux-ci sont peu représentés dans le peuplement. Le problème serait sans doute mieux résolu si le nombre d'arbres échantillons par classes de diamètre était proportionnel au volume relatif de chaque classe dans toute la population, (qui est, dans de nombreux cas, proche d'une répartition de Neyman). Dans chaque zone, on peut choisir les arbres échantillons à l'aide du relascope afin de se rapprocher de cette répartion. L'élimination d'arbres de l 'échantillon du fait de certaines caractéristiques telles que courbures, inclinaisons et fourches doit être faite sur une base valable. Un principe général est qu'aucun arbre ne doit être éliminé de l'échantillon si le tarif de cubage correspondant est applicable, dans la zone inventoriée, à des arbres semblables. Seule exception, les arbres impossibles à mesurer avec précision (par exemple, lorsque les lianes et la végétation épiphyte rendent peu sûres les mesures du diamètre).

Il n'existe pas de solution universelle au problème du choix du nombre d'arbres échantillons pour un tarif de cubage quelconque. Plus ce nombre sera grand, plus l'estimation sera précise, mais cela dépend aussi de nombreux autres facteurs tels que l'intervalle de diamètre et de hauteur des arbres, l'étendue de la forêt, le nombre de formations forestières, la variation des facteurs de station, etc. On a construit pour une essence donnée ou un groupe d'essences des tarifs de cubage à une entrée dans des zones réduites, avec 100, ou même moins, arbres échantillons.

Problèmes posés par l'analyse de régression

a) Une fois qu'on a choisi et mesuré les arbres échantillons et calculé leur volume on dessine le nuage de points avec en ordonnée les volumes V et en abscisse les principales variables indépendantes: diamètre à hauteur d'homme (d) ou d^2 x H. Une première observation directe nous donne la force et le type de la relation et indique s'il faut ajouter d'autres arbres échantillons dans certaines classes des variables indépendantes, ou s'il y a des anomalies résultant des erreurs de mesure ou de calcul.

L'observation du nuage de points indique aussi s'il doit être partagé en deux ou plusieurs parties correspondant à différentes fourchettes de valeurs des variables dépendantes. Dans ce cas, il faudra deux ou plusieurs tarifs de cubage.

b) Si la variation du volume à l'intérieur d'une classe des variables indépendantes augmente avec la variable, il sera nécessaire de:

- transformer les variables dépendantes et indépendantes (par exemple, par une transformation logarithmique) pour obtenir un nuage de points de largeur plus uniforme;

- ou pondérer toutes les variables de chaque classe de variables dépendantes par une quantité proportionnelle à l'inverse de l'écart type des volumes de cette classe;

- ou combiner ces deux procédés

L'égalité de la variance de la variable dépendante dans chaque classe de variables indépendantes est une condition préalable nécessaire pour l'analyse de régression. Si cette condition n'est pas vérifiée on ne pourra évaluer la relation entre le volume et les variables indépendantes ni déterminer l'erreur d'échantillonnage. En général, on peut dire que la variance du volume dans chaque classe de variables indépendantes est proportionnelle au carré du diamètre à hauteur d'homme (d^2) (ou à une puissance supérieure du diamètre ou à $d^2 \times H$ (ou à une puissance supérieure de ce produit). On pourra transformer, par exemple, la régression entre V et d (tarif de cubage à une entrée de la forme: $V = a + b\ d^2$, dont la variance est proportionnelle à d^4 par la formule:

$$\frac{V}{d^2} = \frac{a}{d^2} + b$$

(où les variables ont été pondérées par $\frac{1}{d^2}$ qui est proporitionnel à l'inverse de l'écart type du volume).

c) On doit alors choisir un modèle de tarif de cubage. Ce choix est facilité par l'observation du diagramme des variables pondérées et/ou transformées: si la courbe:

$$\frac{V}{d^2}, \frac{1}{d^2}$$

de l'exemple précédent a une forme parabolique à concavité tournée vers le bas, il peut être pratique d'adopter le modèle corrigé suivant:

$$\frac{V}{d^2} = \frac{a}{d^2} + b + \frac{c}{(d)}$$

qui équivaut à:

$$V = a + c\ d + b\ d^2$$

Une autre façon de construire le modèle est de faire une liste des variables indépendantes pondérées les plus importantes, par exemple:

$$\frac{1}{d^2}, \frac{1}{d}, \text{constante}, \frac{H}{d}, H, \frac{H}{d^2}$$ (expressions, pondérées

respectivement par $\frac{1}{d^2}$, de: constante, d, d^2, dH, d^2H, H)

puis d'effectuer une analyse de régression progressive multiple. Il existe des programmes d'ordinateur qui fournissent, pour cette méthode, une série d'équation. La première comprend une seule expression de la variable indépendante:

(par exemple, $\frac{V}{d^2} = \frac{a}{d^2} + b$)

et chacune des suivantes diffère par l'addition d'une variable supplémentaire. La dernière est donc la plus complète et la plus précise, mais le gain de précision peut être faible par rapport à l'avant-dernière. Pour interpréter les sorties de l'ordinateur et pour choisir les entrées, il faut l'aide d'un statisticien. On peut ajouter des contraintes au modèle dans ces programmes, telles que la fixation d'une valeur à la constante dans les équations.

Avec le développement du calcul sur ordinateur on aura de plus en plus recours à la pondération (comprenant la recherche du meilleur facteur de pondération) et à l'analyse de régression progressive multiple.

Erreurs statistiques dues aux tarifs de cubage

On peut vérifier la valeur de l'ajustement par analyse de régression à l'aide du coefficient de corrélation multiple. Celui-ci est égal au coefficient de corrélation lorsque la variable dépendante (volume) n'est fonction que d'une seule expression des variables indépendantes comme, par exemple: $V = a + b\ d^2$. Cet ajustement sera d'autant meilleur que ce coefficient sera voisin de 1 (valeur maximum du coefficient lorsque l'ajustement est parfait).

L'estimation de la variance et de l'erreur type de la valeur moyenne du volume donnée par le tarif pour des valeurs déterminées des variables indépendantes, et l'estimation de l'erreur type liée à l'application de cette valeur aux arbres de l'échantillon ayant les mêmes caractéristiques, sont données par des formules assez compliquées demandant le concours d'un statisticien. Le problème posé par la combinaison de cette erreur avec l'erreur d'échantillonnage est difficile. Il ne semble pas avoir été beaucoup traité dans la littérature forestière. Là aussi, il faudra recourir à un statisticien car il est nécessaire de connaître l'incidence des tarifs de cubage sur l'erreur totale sur les volumes.

Groupement des essences

Dans certains cas, et notamment dans les inventaires des forêts feuillues tropicales hétérogènes, il n'est pas possible d'avoir des tarifs de cubage distincts pour chaque essence. Il existe plusieurs solutions à ce problème qui sont:

- établir des tarifs de cubage distincts pour les essences les plus importantes et utiliser un tarif commun pour les autres essences;

- établir des tarifs de cubage pour les essences les plus importantes et regrouper chacune des autres avec l'une de ces essences par une étude comparative soit du coefficient de forme (dans le cas de tarifs à une entrée) soit du diagramme diamètre-hauteur (dans le cas de tarifs à deux entrées);

- regrouper les essences en classes homogènes de manière à avoir plus d'arbres échantillons pour chaque tarif.

On peut faire ce dernier regroupement plus ou moins objectivement en comparant les nuages de points correspondant aux différentes essences. Cela peut se faire aussi par une analyse de covariance par groupes de deux essences (lorsque celles-ci sont peu nombreuses) ou par des méthodes statistiques de classification automatique. Ces dernières méthodes sont les plus complètes et les plus objectives et donc les meilleures. Elles nécessitent cependant une certaine expérience et des programmes d'ordinateur appropriés, ainsi que l'aide d'un statisticien.

343 Estimation du volume par des fonctions de décroissance. On obtient ces fonctions par une analyse de régression. Elles donnent, en général, pour une essence ou un groupe d'essences d'une zone donnée, le rapport diamètre de la tige à une certaine hauteur/diamètre à hauteur d'homme (ou au-dessus des contreforts). Ce rapport est exprimé en fonction de la hauteur considérée. On pourra avoir des fonctions de décroissance différentes pour chaque classe de diamètre d'une même essence ou groupe d'essences.

Une fois qu'on a déterminé les fonctions de décroissance on calcule facilement le volume d'un arbre de l'échantillon dont on a mesuré le diamètre à hauteur d'homme et la hauteur du fût (ou une autre hauteur). On fait ce calcul en divisant la tige en billons de même longueur et en additionnant les volumes de chaque billon. Ceux-ci sont calculés par des formules géométriques dans lesquelles les diamètres sont donnés par les fonctions de décroissance. Cette méthode est longue car il faut calculer le volume de chaque arbre de l'échantillon mais le problème ne se pose pas lorsqu'on dispose d'un ordinateur.

Les remarques du paragraphe 342.4 sur l'aspect statistique des tarifs de cubage sont valables ici car on utilise dans les deux cas l'analyse de régression. On peut, de plus, résoudre le problème du regroupement des essences (et/ou des classes de diamètre à l'intérieur d'une même essence) par la même méthode. La solution adoptée devrait être aussi objective que possible, en tenant compte du coût et d'autres facteurs limitants.

344 Choix de la meilleure technique d'estimation des volumes. Il n'y a pas de solution générale à ce problème dans les inventaires forestiers. L'estimation des volumes par des mesures complémentaires sur les arbres de l'échantillon ou à l'aide d'analyses de régression (tarifs de cubage, fonctions de décroissance) ont toutes deux des avantages et des inconvénients qui sont résumés ci-dessous.

L'avantage principal de la première méthode est qu'il n'y a aucune erreur d'échantillonnage sur le volume, mais seulement celle qui correspond au plan d'échantillonnage de l'inventaire. Il y a plusieurs inconvénients: le principal est le coût supplémentaire dû à la longueur du comptage. Un autre inconvénient vient des erreurs supplémentaires de mesure qui peuvent être importantes et difficiles à évaluer avec précision.

La deuxième méthode introduit une composante supplémentaire à l'erreur totale, qui peut être significative par rapport aux autres composantes (autres erreurs d'échantillonnage et de mesure). Il risque aussi d'y avoir des biais aux divers stades de la construction des tarifs de cubage ou des fonctions de décroissance. Mais cette méthode a de grands avantages: elle est en général bien moins coûteuse que la méthode directe d'estimation des volumes; les tarifs de cubage peuvent être utilisés pour d'autres inventaires et à d'autres fins et éventuellement perfectionnés; les mesures effectuées pour construire les tarifs, en général plus détaillées que par l'autre méthode, peuvent servir d'éléments de base à d'autres études dendrométriques. Ces avantages sont particulièrement intéressants pour les pays en voie de développement de la zone tropicale où la dendrométrie est un domaine de recherche nouveau et où les données de mesure et les tarifs de cubage manquent.

4 Evaluation de la qualité

41 Remarques préliminaires sur l'évaluation de la qualité

411 Définition de l'évaluation qualitative en inventaire forestier. Le sous-chapitre précédent traite des méthodes utilisées en inventaire forestier pour estimer objectivement les volumes bruts des arbres à l'intérieur de l'échantillon (volume brut total, ou volume brut du fût, ou volume brut jusqu'à une découpe minimum), ces volumes étant ensuite extrapolés à l'ensemble des peuplements inventoriés suivant le plan de sondage adopté. Chaque arbre ou partie d'arbre a, en dehors de ses dimensions, d'autres caractéristiques telles que forme, aspect, défauts et pourriture, qui rendent son bois plus ou moins utile et propre à certains emplois. La classification, la cotation ou quantification de ces caractéristiques, l'enregistrement et le traitement des données correspondantes - qui constituent l'évaluation de la qualité - sont donc nécessaires pour fournir aux utilisateurs des données mieux adaptées et plus détaillées.

412 Evaluation des ''volumes nets'' et utilité de cette notion (eu égard particulièrement aux inventaires des forêts feuillues tropicales hétérogènes). On classe très souvent les défauts externes des arbres sur pied en deux catégories principales - ceux qui sont acceptables pour une certaine utilisation du bois et ceux qui ne le sont pas. Le volume des parties de l'arbre qui ont cette catégorie de défauts - ''parties défectueuses'' - et parfois celui de l'arbre entier sont déduits du volume brut pour obtenir ce qu'on appelle ''volume net'' (voir paragraphe 31). Dans de nombreux rapports d'inventaire, les estimations de ''volume net sciage'' ou de ''volume net contreplaqué'', sont obtenues en soustrayant les parties impropres au sciage ou à la production de placages des volumes bruts correspondants. Bien que ce procédé soit couramment utilisé, la validité et l'utilité de la notion de ''volume net'' sont douteuses dans le cas d'un inventaire de forêts feuillues tropicales hétérogènes, pour les raisons suivantes:

Il y a toujours dans l'évaluation de la qualité un facteur subjectif que l'on doit réduire au minimum par une bonne classification et cotation des défauts. Cela est particulièrement important dans les forêts tropicales où le personnel d'inventaire travaille

dans l'optique des aménagistes et des propriétaires plutôt que dans celle des utilisateurs. Les volumes nets de bois de sciage qui sont donnés par l'inventaire peuvent ainsi ne pas correspondre aux volumes réels utilisables pour les sciages.

Même si ce biais provenant d'une différence de point de vue est négligeable, il existe d'autres raisons pour lesquelles les volumes nets diffèrent des volumes exploitables, notamment:

- l'évaluation de la qualité des arbres sur pied ne tient souvent pas compte des défauts internes qui ne sont pas visibles et que l'on ne peut pas prévoir ou estimer avec précision par une observation externe. L'évaluation peut être d'autre part mauvaise même pour les défauts externes du fait qu'il est parfois difficile d'analyser les parties hautes de l'arbre;

- pour la plupart des feuillus tropicaux en mélange, on ne connaît pas assez bien les facteurs de station et de milieu qui peuvent influer sur la qualité du bois. Ce n'est pas le cas pour la plupart des forêts européennes que forestiers et exploitants connaissent depuis longtemps, et où il est beaucoup plus facile de déterminer le pourcentage exact des pertes à l'exploitation et des bois rejetés;

- les conditions d'utilisation des feuillus tropicaux évoluent rapidement et profondément sur les marchés locaux et internationaux, les exigences de qualité diminuent lorsque la demande augmente, les usines locales se modifient, les unités d'exploitation se mécanisent et changent d'échelle et de méthode de travail, etc. Les normes appliquées pour définir les volumes défectueux peuvent donc varier d'une année à l'autre et la différence entre le ''volume net'' et le volume effectivement exploitable peut augmenter encore plus.

C'est pourquoi, comme nous l'avons vu au paragraphe 31, l'estimation des ''volumes nets'' ne paraît pas être très utile pour les feuillus tropicaux mélangés, tout au moins sur le plan économique. Cependant, là n'est pas le seul but de l'évaluation qualitative qui a d'autres applications utiles en inventaire forestier.

413 Autres applications de l'évaluation qualitative en inventaire forestier

Comparaison de la qualité d'un même peuplement à des moments différents

L'évaluation qualitative est utile pour contrôler le matériel sur pied. Si elle est répétée dans les inventaires successifs d'une même zone, elle permet d'étudier l'évolution des peuplements du point de vue de la qualité et de l'importance des défauts. Pour une telle étude comparative, on n'a pas besoin d'une équivalence entre le volume des classes ''non défectueuses'' et le volume exploitable pourvu que la classification qualitative des volumes sur pied soit valable. Ce qui compte, par exemple, c'est qu'une meilleure cotation au deuxième inventaire par rapport au premier traduise une amélioration de faits de la qualité des bois sur pied.

Comparaison des qualités de plusieurs peuplements

L'estimation qualitative est aussi utile pour comparer deux ou plusieurs zones inventoriées. On n'a pas besoin ici non plus d'établir l'équivalence entre les volumes des classes ''non défectueuses'' et le matériel utilisable mais les indicateurs de qualité doivent être valables.

Stratification du volume sur pied en vue d'études ultérieures

Il peut être utile, de stratifier les volumes sur pied en classes de qualité, surtout si l'on cherche à estimer un ''coefficient de récolement'' (ou de commercialisation ou de rendement) à savoir le quotient entre volume utilisable (ou ''exploitable'' ou ''commercial'') et volume brut ou parfois net fourni par l'inventaire. Ce coefficient est en général significativement différent d'une classe de qualité à l'autre si la classification qualitative a un sens, de sorte que l'estimation d'un coefficient global est amélioré par la classification qualitative.

Le sous-chapitre 5 ''études de récolement donne des indications sur l'évaluation de ces coefficients de commercialisation.

42 Méthodes d'évaluation de la qualité

Il est pratique de présenter ces méthodes dans deux catégories: méthodes d'évaluation des caractéristiques et des défauts externes et méthodes d'évaluation des défauts internes. Les caractéristiques et les défauts externes peuvent être relevés aussi bien sur les arbres sur pied que sur les arbres abattus alors que l'on ne peut estimer les défauts internes des arbres sur pied que par des observations incomplètes et assez imprécises.

Dans un inventaire forestier donné, on peut faire une évaluation qualitative (externe et éventuellement interne), d'une part, sur tous les arbres de l'échantillon (ou d'un sous-échantillon) et, d'autre part, sur un petit sous-échantillon d'arbres abattus, qui pourra être celui utilisé pour les tarifs de cubage. On peut alors faire une analyse de régression entre les deux catégories de données correspondantes pour améliorer les données qualitatives obtenues à partir de l'observation des arbres sur pied. On pourra noter d'autres critères de qualité sur les arbres abattus mais, pour ceux qui sont communs aux arbres sur pied et aux arbres abattus, il faudra utiliser le même système de cotation et de quantification ainsi que d'enregistrement pour que la comparaison soit possible.

421 Estimation des caractéristiques et des défauts externes

421.1 Unité de relevé pour l'évaluation

Pour évaluer les caractéristiques et les défauts externes des arbres sur pied et abattus, deux méthodes sont possibles:

1) la méthode par billes: on divise le fût en une série de billes de longueurs ou fixes ou proportionnelles à la longueur totale du fût ou variables et dont la qualité est évaluée séparemment;

2) la méthode de l'arbre entier: on classe le fût d'après une série de classes de qualité ou de défaut bien définies.

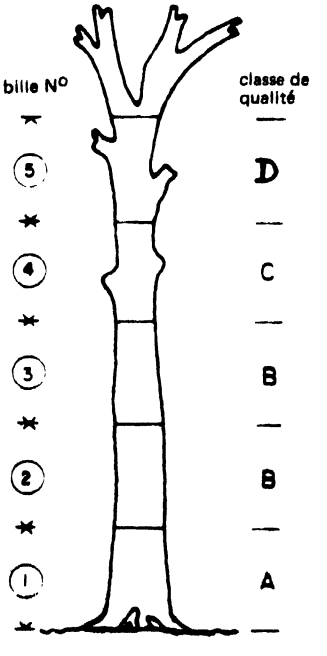
421.11 La méthode par billes

a) Billes égales de longueur fixe

La longueur des billes reste constante et dépend des conditions locales (voir figure V-2). La longueur de la bille standard (cinq mètres, ou environ 16 pieds) est souvent utilisée. Le volume brut de chaque bille s'évalue à l'aide des fonctions de défilement ou d'après un pourcentage du volume brut de la tige entière calculé à partir des arbres échantillons utilisés pour établir les tarifs de cubage, ou en mesurant le diamètre au centre de la bille. Il faudra prendre soin d'attribuer les défauts aux billes correspondantes.

Figure V-2

Evaluation de la qualité - billes égales de longueur fixe

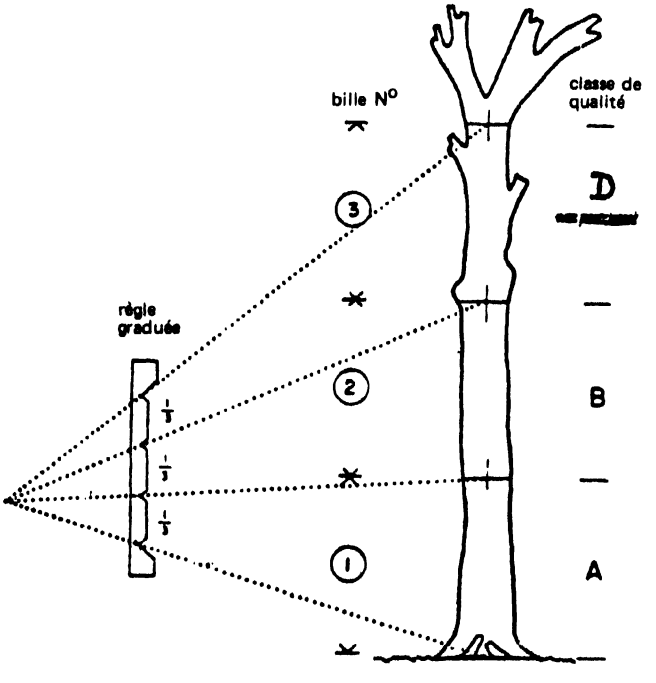


b) Billes de longueur égale à une fraction de la longueur de la tige

L'évaluation qualitative est réalisée en divisant la tige en billes de longueur égale à une fraction de la longueur de la tige (figure V-3). Par cette méthode, le nombre de billes reste constant alors que la longueur de chacune varie proportionnellement avec celle du fût. Les limites des billes sont déterminées à l'aide d'une règle graduée qu'on peut utiliser indépendamment de la distance entre l'arbre et l'observateur. L'évaluation qualitative devient plus détaillée, plus longue et aussi moins précise à mesure que le nombre de billes augmente car la répartition des défauts entre les diverses billes devient plus difficile à évaluer. La figure V-3 montre une division en trois sections. Ce nombre est assez faible pour permettre un travail assez rapide mais suffisant pour conserver toute leur valeur aux cotations. On estime le volume brut de chaque bille à partir des fonctions de défilement, à partir des données des arbres échantillons utilisées dans les tarifs de cubage ou par la mesure directe de la longueur et du diamètre moyen de chaque bille. Ce dernier procédé est cependant assez long.

Figure V-3

Evaluation qualitative - Billes de longueur égale à une fraction de la longueur de la tige



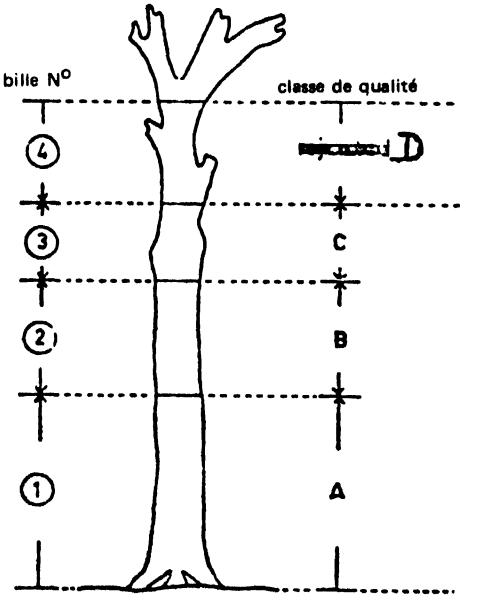
c) Billes de longueur variable

On divise la tige en fonction de la localisation des défauts importants. Le principe est de séparer les billes considérées utiles des parties défectueuses. Cette méthode est illustrée à la figure V-4. On déterminera ''au jugé'' les limites de chaque bille. Pour évaluer les volumes, la longueur des billes devra être déterminée et on utilisera des fonctions de défilement. Si ces fonctions ne sont pas disponibles, il faudra, en plus, mesurer le diamètre aux extrémités ou au milieu de chaque bille.

Ce procédé est précis et pratique pour étudier la qualité d'après des mesures faites sur les arbres abattus. Il est cependant discutable lorsqu'on l'utilise pour évaluer la qualité des arbres sur pied car il est alors long, difficile et très subjectif. De plus, comme nous avons pu le voir au paragraphe 412, on ne peut distinguer avec précision les parties défectueuses des parties exploitables, tout au moins dans le cas des feuillus tropicaux mélangés.

Figure V-4

Evaluation qualitative - Billes de longueur variable



421.12 Pas de division de la tige

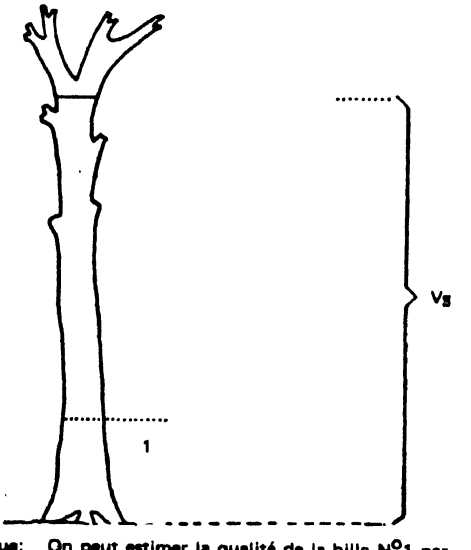
La figure V-5 nous montre comment, dans la méthode de l'arbre entier, la qualité de toute la tige est estimée à partir de l'examen de la seule partie inférieure de l'arbre. La longueur de cette bille de pied ne dépasse pas, en général, six à huit mètres. Habituellement, on utilise une même longueur fixe tout au long d'un inventaire donné; mais il est parfois utile de choisir des longueurs différentes suivant les essences. Pour les arbres à contreforts, la bille considérée commence au-dessus des contreforts. Le volume est assimilé au volume total de l'arbre. En général, la bille de pied représente la plus grande partie du volume total et c'est aussi la partie qui a la plus grande valeur potentielle.

Les avantages de cette méthode, par rapport aux autres, sont les suivants:

- il est plus facile de déterminer la classe de qualité sur la partie inférieure du fût;
- on réduit la possibilité d'introduire un biais subjectif;
- la méthode est plus rapide;
- les résultats de l'évaluation peuvent être présentés sous la forme de tableaux de nombres de tiges;
- le cubage est plus simple.

Figure V-5

Evaluation qualitative - Pas de division de l'arbre



Remarque: On peut estimer la qualité de la bille N°1 par référence à une classification qualitative donnée. La qualité de l'arbre entier se déduit de la classe de la bille N°1.

421.2 Cotations

Une fois que l'on a déterminé le volume brut d'une unité de relevé (arbre ou bille) il nous faut l'attribuer à l'une des classes de qualité. On doit choisir la taille et le nombre des classes de qualité en tenant compte du but de cette évaluation qualitative, des risques de subjectivité qui augmentent avec la finesse de la classification et du fait qu'une classification trop large ne donne que des renseignements relativement peu intéressants.

On peut affecter le volume d'une unité de relevé à une classe de qualité donnée globalement par estimation globale des différents caractères et défauts, ou d'une manière analytique, en estimant séparément les différents types de défauts et en regroupant ensuite les différentes cotations pour affecter finalement l'unité à une des classes de qualité.

Le premier type d'évaluation est souvent utilisé dans des classifications simples sans division de l'arbre, celui-ci étant considéré comme ''rejeté'' ou ''retenu'' ou encore ''sain'', ''défecteux'' ou ''douteux''. On a utilisé le deuxième type en Afrique occidentale avec une classification basée sur des longueurs égales à une fraction des longueurs de fûts. Les défauts sont regroupés en trois catégories: forme de la bille (courbures, coudes, section ovale, etc.), état sanitaire (branches cassées, noeuds pourris, etc.), aspect du bois (grain, cicatrices, noeuds sains, vissage, etc.). Chaque bille est notée par un nombre de un à cinq pour chaque catégorie de défauts. On regroupe alors les 3 notes pour affecter à la section entière une note globale (de 1 à 5).

On doit cependant préférer une évaluation sérieuse de type analytique plutôt que l'approche globale qui est plus subjective. Le nombre de cotations possibles doit être à la fois assez grand pour permettre une évaluation détaillée et assez petit pour que le procédé soit aussi sûr que possible. Cinq classes paraît un compromis acceptable.

421.3 Recommandations touchant l'évaluation des caractéristiques et des défauts externes en inventaire forestier

Si l'on évalue la qualité à partir d'un sous-échantillon d'arbres de l'échantillon complet de l'inventaire, il faudra choisir ces arbres d'une manière strictement objective. N'importe quel procédé systématique tel qu'''une sous-parcelle dans chaque unité d'échantillonnage'' ou ''une unité d'échantillonnage toutes les n'', ou ''chaque iième arbre de l'unité d'échantillonnage'' est bon pourvu qu'il n'entraîne pas d'autre biais.

On peut réduire de plusieurs manières le biais subjectif dans l'appréciation qualitative. Une des méthodes consiste à donner une ''clef de cotation'' claire et complète dans laquelle sont indiqués tous les défauts et les degrés de gravité possibles et la note correspondante. Il est préférable de demander au personnel de terrain de n'enregistrer que les défauts et leurs degrés de gravité, les notes étant attribuées ensuite au bureau, surtout lorsque les cotations correspondent à une combinaison de plusieurs défauts. Pour obtenir des cotations sûres et homogènes il faut réduire au minimum le nombre de personnes chargées du travail d'appréciation qualitative et les former soigneusement. Ce travail devrait être réalisé par un seul homme de l'équipe, et de préférence, le chef d'équipe.

On conseille d'utiliser des jumelles pour observer les billes supérieures des tiges sur pied lorsqu'on utilise le procédé par sections d'arbre. L'observateur devra faire le tour des arbres, à une distance donnée, afin de faire un examen complet. C'est là une précaution essentielle, mais qui n'est pas toujours possible dans les forêts tropicales, d'accès souvent difficile.

422 Evaluation des défauts internes

422.1 Evaluation des défauts internes sur des arbres abattus

On évalue les défauts internes sur des sections faites à la base, à hauteur d'homme ou, parfois, à d'autres niveaux. On pourra alors estimer avec précision le volume des parties pourries et donc des parties saines. Le problème le plus important est de noter, de

regrouper et de classifier d'autres défauts internes tels que les dégâts causés par les insectes, l'excentricité, les taches, les fentes, etc. Dans ce cas, on devra aussi faire un barème de cotation valable, dans lequel on regroupera les différents défauts et leurs degrés de gravité. Il sera utile de vérifier la validité des règles de classement par qualité existantes.

422.2 Evaluation de la pourriture sur les arbres sur pied

Depuis quelques années, on utilise des tarières électriques ou mécaniques pour déterminer et mesurer la pourriture à hauteur d'homme des arbres sur pied dans les forêts tropicales hétérogènes. D'après ces observations, il est possible de détecter la présence de pourriture à hauteur d'homme avec une précision suffisante (les arbres ayant une pourriture légère ou excentrique et classés incorrectement comme étant sains à hauteur d'homme sont relativement peu nombreux). Cependant, il ne paraît pas possible, tout au moins dans certaines forêts, de quantifier avec précision la pourriture à hauteur d'homme, parce que tant les arbres eux-mêmes que la pourriture ont une forme excentrique et irrégulière. De plus, dans certains cas il n'y a qu'une très faible corrélation entre le diamètre de la pourriture à hauteur d'homme et sa hauteur ce qui fait qu'une estimation directe et sûre du volume de la pourriture, et donc du volume sain, ne paraît pas possible. Enfin, la présence de contreforts élevés et les pourritures situées dans la partie supérieure de la tige posent des problèmes.

Mais même limitée à hauteur d'homme, l'observation de la pourriture est très utile. Elle indique la présence de pourriture dans une zone forestière donnée, ce qui permet une comparaison avec d'autres forêts. Elle permet aussi de stratifier le volume sur pied (arbre par arbre) en classes de qualités (telles que ''sans pourriture à hauteur d'homme'', ''faible pourriture à hauteur d'homme'' et ''forte pourriture à hauteur d'homme'') que l'on pourra utiliser dans des études ultérieures et notamment pour évaluer les coefficients de récolement.

5 Etudes de récolement

51 Principe

Pour les volumes, les chiffres que l'on obtient habituellement dans un inventaire forestier concernent le volume brut jusqu'à un diamètre donné, exprimé par classes de diamètre et groupes de classes de diamètre, par essences et par classes de qualité, pour chaque unité d'inventaire ou strate de cette unité. Pour certaines utilisations finales telles que les sciages et les contreplaqués, ce volume brut est une surestimation du volume réellement utilisable, c'est-à-dire de la valeur économique à considérer dans les études de préinvestissement et dans les plans économiques nationaux et locaux. Il faut donc estimer le rapport entre le volume exploitable et le volume brut donné par l'inventaire par essences ou groupes d'essences et par blocs d'inventaires compte tenu des conditions d'aménagement forestier, d'exploitation, d'accessibilité et d'infrastructure, d'utilisation du bois et des marchés intérieurs et internationaux. On critique trop souvent les documents d'inventaire des pays tropicaux parce que les renseignements fournis par ces opérations coûteuses ne peuvent être utilisés directement à des fins économiques non plus que pour la planification, qui devraient pourtant être leur principal objectif. Pour obtenir une estimation du bois utilisable, économistes et industriels utilisent un pourcentage arbitraire du volume brut (ou le volume dit ''net''), qui est rarement valable.

Le coefficient de récolement sert aussi au propriétaire et à l'aménagiste des forêts inventoriées. En effet, à partir du prix courant du bois utilisable, l'étude de récolement permet de déterminer le prix auquel on pourra ''vendre'' les volumes sur pied compte tenu des coûts d'exploitation et de transport. L'information venant de cette étude est en général utile aux propriétaires ou aux aménagistes pour traiter avec les exploitants.

On s'est demandé si le personnel de l'inventaire devait s'occuper de cet aspect ou si ce travail devrait plutôt être laissé aux économistes ou aux spécialistes d'exploitation.

Il paraît cependant évident que ce sont les personnes responsables des travaux d'inventaire qui connaissent le mieux les résultats qu'ils produisent, leur validité et leur application. Ils devraient donc, seuls ou de préférence en coopération avec les spécialistes d'exploitation ou d'autres spécialistes, estimer ces coefficients.

52 Problèmes connexes

Il est également intéressant de connaître, outre le volume exploitable (ou, ce qui revient au même, la part du volume brut qui est laissé en forêt), le pourcentage de chaque qualité commerciale dans ce volume. En effet, les valeurs et l'utilisation de chaque catégorie peuvent être différentes. Dans une étude de récolement, on cherchera à estimer ces pourcentages bien que, dans certains cas, le classement par qualités ne soit pas aussi objectif qu'il le faudrait.

Les volumes exploitables à considérer sont ceux qui arrivent aux scieries si le bois est travaillé sur place, ou aux ports s'il est exporté. Dans le premier cas on applique le coefficient de transformation de la scierie au volume exploitable donné par l'inventaire pour obtenir le rapport entre la production de l'usine et le volume de bois d'une forêt donnée.

Du fait de l'évolution de l'utilisation du bois, des marchés, de l'infrastructure et éventuellement aussi des conceptions en matière d'aménagement et d'exploitation, les résultats d'une étude de rendement ne sont valables que pour une très courte période et devraient donc être mis à jour dès que cela est nécessaire. Les coefficients de récolement pour une région ou un pays donnés, varient avec l'accessibilité et l'utilisation possible des forêts. Il est par exemple très important de traiter différemment le cas d'une forêt utilisée pour produire de la pâte à papier et celui d'une autre utilisée pour produire des sciages et du contreplaqué, ou le bois destiné à l'industrie locale et celui qui est exporté sous forme de grumes.

Dans les forêts feuillues tropicales hétérogènes, on devra faire les études de récolement par essences ou groupes d'essences destinés à une même utilisation. Dans la plupart des cas, un coefficient de récolement global pour toutes les essences ou grands groupes d'essences ne veut rien dire, car il existe des différences énormes de rendement et de valeur unitaire à l'intérieur de ces groupes.

53 Procédure générale

531 Phases principales d'une étude de récolement

Pour les forêts feuillues tropicales hétérogène, les études de récolement peuvent se diviser en trois parties:

- estimation de la sélection des arbres sur pied; si, pour certaines essences, tous les arbres qui, selon le plan d'aménagement, peuvent être abattus le sont effectivement, pour beaucoup d'autres il y a une sélection au niveau des arbres sur pied. Ainsi, les arbres que l'on pense pourris à l'intérieur (après avoir frappé la tige avec un marteau) ne sont, en général, pas abattus;

- estimation du pourcentage d'arbres abattus mais qui ne sont pas utilisés à cause des fentes, des cassures, des pourritures importantes non décelées auparavant, des mauvaises conditions d'exploitation, etc.;

- estimation, pour chacune des classes de qualité retenues pour l'inventaire, du pourcentage de rebuts, et également peut-être du pourcentage des différentes qualités commerciales, suivie par une détermination des coefficients de rendement globaux et des pourcentages par classe de qualité pour l'ensemble du volume brut.

532 Procédure

S'il n'y a pas d'unité d'exploitation dans la zone inventoriée ou dans une zone semblable voisine, on pourra réaliser une opération d'exploitation expérimentale. Cette solution est coûteuse mais elle permet de mieux préparer l'étude. Cependant, dans ce cas, l'exploitation ne s'insère pas nécessairement dans le système commercial et l'étude risque de donner des coefficients correspondant à des situations optimales, et donc pas suffisamment réalistes.

Si on fait un sondage parmi les unités d'exploitation, l'échantillon de ces unités devra être soigneusement constitué et stratifié en fonction de la principale destination du bois (par exemple, transformation sur place ou exportation des grumes, pâte à papier ou autres usages industriels), et si possible en fonction aussi du système d'exploitation utilisé et de l'accessibilité si celle-ci varie d'une manière significative d'une zone à l'autre. Le procédé le plus évident, à l'intérieur d'une unité d'exploitation, semble être le suivant:

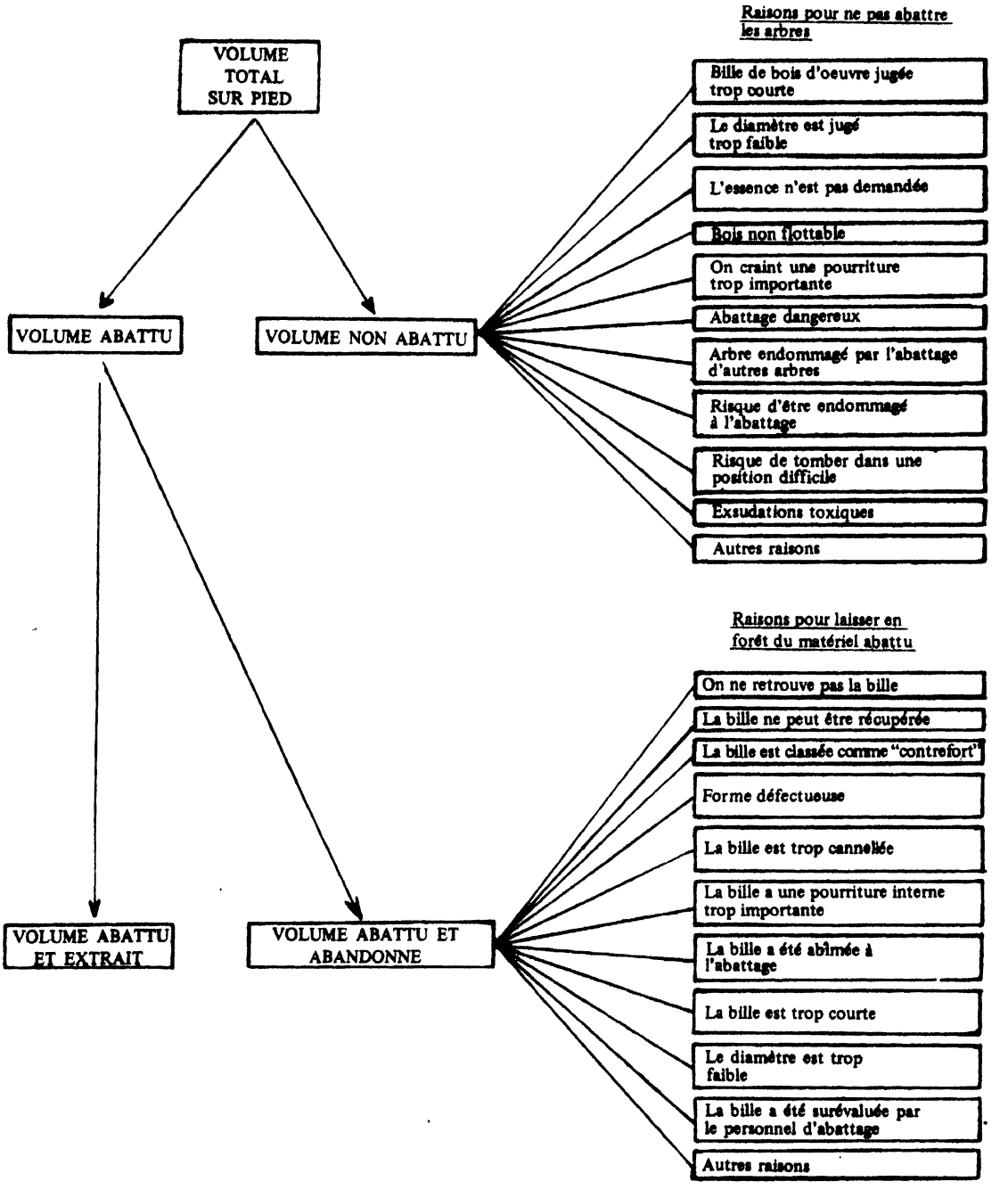
- avant exploitation, dénombrement complet et numérotation de tous les arbres des essences étudiées, au-dessus du diamètre minimum retenu, avec estimation du volume brut et de la qualité, dans une zone qui doit être exploitée prochainement;

- après exploitation, comptage des arbres abandonnés, sur pied ou abattus, et mesure des billes extraites, des pertes à l'exploitation et des rebuts.

L'enregistrement et le traitement des données (utilisant éventuellement l'analyse de régression multiple entre les classes de qualité utilisées pour l'inventaire et les catégories commerciales) doivent être réalisés avec soin. Le coût total d'une étude complète de récolement n'est pas négligeable et celle-ci devra être prévue dans la phase de programmation de l'inventaire.

533 Exemple

L'organigramme suivant illustre le principe et les diverses étapes d'une étude de récolement. Il est inspiré d'un organigramme analogue extrait d'une étude faite dans le cadre de l'inventaire PNUD/FAO des forêts à diptérocarpacées de Sarawak.


VOLUME TOTAL SUR PIED
VOLUME ABATTU
VOLUME NON ABATTU
VOLUME ABATTU ET EXTRAIT
VOLUME ABATTU ET ABANDONNE
Raisons pour ne pas abattre les arbres
Bille de bois d'oeuvre jugée trop courte
Le diamètre est jugé trop faible
L'essence n'est pas demandée
Bois non flottable
On craint une pourriture trop importante
Abattage dangereux
Arbre endommagé par l'abattage d'autres arbres
Risque d'être endommagé à l'abattage
Risque de tomber dans une position difficile
Exsudations toxiques
Autres raisons
Raisons pour laisser en forêt du matériel abattu
On ne retrouve pas la bille
La bille ne peut être récupérée
La bille est classée comme "contrefort"
Forme défectueuse
La bille est trop cannelée
La bille a une pourriture interne trop importante
La bille a été abîmée à l'abattage
La bille est trop courte
Le diamètre est trop faible
La bille a été surévaluée par le personnel d'abattage
Autres raisons

6 Etudes d'accessibilité

61 Introduction

Les sous-chapitres 1 à 5 traitent de l'estimation des volumes dans un inventaire forestier à partir des données recueillies sur le terrain. Outre la quantité et la qualité des volumes sur pied et exploitables, il faut connaître les paramètres physiques et socio-économiques qui ont une incidence sur l'aménagement de la forêt et les coûts d'exploitation. Ces paramètres définissent l'accessibilité des volumes sur pied et le rendement futur des forêts inventoriées.

Ces paramètres d'accessibilité doivent être évalués dans le cadre de l'inventaire parce que:

- les résultats d'inventaire doivent être aussi complets et explicites que possible, et doivent donc comprendre des données sur l'accessibilité afin de fournir aux utilisateurs des renseignements dont ils pourront se servir directement et immédiatement;

- les équipes d'inventaires recueillent des données dans un nombre important d'unités choisies objectivement dans toute la zone inventoriée. Elles sont donc mieux placées que la plupart des utilisateurs pour relever aussi des données sur l'accessibilité, d'autant plus qu'il peut être utile pour des études ultérieures d'avoir les données de volume et d'accessibilité relevées, pour partie ou en totalité, dans les mêmes unités d'échantillonnage;

- il est beaucoup plus pratique et économique de faire relever ces données par l'équipe d'inventaire plutôt que de faire un autre sondage uniquement pour recueillir ces renseignements.

Pour l'accessibilité, comme pour les volumes, l'échelle et le degré de précision demandés dépendent du type de résultats recherchés et la méthode utilisée varie en conséquence. S'il existait une approche standard pour estimer l'accessibilité - ce qui n'est malheureusement pas le cas - cela faciliterait de beaucoup l'utilisation et l'interprétation comparatives des résultats.

Pour un niveau donné d'inventaire forestier (mondial, régional, national, subnational ou local) de préinvestissement et un niveau donné de précision, l'étude d'accessibilité est ce qui permet de répondre à la question suivante (Nilsson, 1972).

> ''Quelle quantité de bois, par essences, dimensions et qualités, peut-on livrer aux marchés (scieries) éventuels dans diverses fourchettes de prix unitaires?''

Etant donnée cette définition, que l'on pourra compléter par le facteur temps, la méthode utilisée pour évaluer l'accessibilité dans un inventaire forestier donné devra permettre de répondre aux questions suivantes:

1) Quels paramètre doit-on recueillir?
2) Comment peut-on quantifier ou classer ces paramètres?
3) Quelles relations quantitatives doit-on utiliser pour estimer les coûts d'extraction et d'aménagement à partir de ces paramètres d'accessibilité?

Il est évident qu'il faudra maintenir un dialogue constant entre les responsables spécialistes d'inventaire et les spécialistes d'exploitation afin d'établir une méthode valable pour étudier l'accessibilité dans un inventaire forestier donné. Cela vaut particulièrement pour le choix et la quantification des paramètres d'accessibilité; quant à la troisième question, elle est plutôt du ressort des spécialistes de l'exploitation. Dans les paragraphes suivants nous ne traiterons que du choix et de la quantification des paramètres d'accessibilité.

62 Choix des paramètres d'accessibilité

621 Les coûts de l'exploitation, du transport et des routes forestières varient en fonction d'un nombre presque infini de facteurs. Certains ont une influence importante alors que d'autres n'ont qu'une incidence minime et peuvent donc être écartés lors de l'évaluation de l'accessibilité. Dans la pratique, on devra établir une corrélation entre les facteurs retenus et les coûts d'exploitation et de transport. Cela peut se faire de différentes façons, la plus simple consistant à établir des modèles mathématiques pour chaque phase des travaux, en chiffrant l'influence des facteurs retenus sur le coût. Lorsqu'il élabore son modèle, le spécialiste de l'exploitation utilisera autant que possible les paramètres déjà mesurés dans l'inventaire et n'introduira qu'à bon escient des paramètres supplémentaires, qui risquent d'être difficiles ou coûteux à mesurer. L'avantage d'utiliser des modèles mathématiques est que ceux-ci peuvent être inclus dans le programme de traitement automatique de l'inventaire ce qui permet d'évaluer l'accessibilité en même temps que les résultats quantitatifs et qualitatifs de l'inventaire.

On peut classer les paramètres d'accessibilité essentiellement en deux groupes, à savoir les paramètres concernant les conditions de la forêt et les paramètres socio-économiques.

Les valeurs de ces paramètres obtenues pour tout ou partie d'une forêt inventoriée doivent être utilisées conjointement avec les données sur la production dans les modèles mathématiques utilisés pour établir les coûts d'aménagement et d'exploitation. La productivité des différentes opérations forestières (principalement exploitation, transport, construction et entretien des routes) est déterminée à partir d'études d'ergonomie et de plans de contrôle de la production et des coûts.

On peut aussi appliquer d'autres classifications aux paramètres d'accessibilité. Il est capital, par exemple, de distinguer les paramètres stochastiques (volumes par classes de diamètre) que l'on estime par un échantillonnage sur le terrain de ceux qui sont fixes (par exemple, distance entre le peuplement inventorié et la scierie ou le marché). Ces derniers ne sont en principe pas mesurés sur le terrain. Qu'un paramètre soit obtenu par une méthode d'échantillonnage ou qu'il soit fixe il dépend toujours de facteurs pratiques.

Comme d'autres paramètres, on peut attribuer aux paramètres d'accessibilité (voir paragraphe 221 du chapitre 3) des valeurs continues ou discrètes à l'aide de mesures directes, ou bien on peut les rapporter à des classes (notamment lorsqu'il s'agit de paramètres descriptifs ou qualitatifs).

622 Les paramètres concernant les conditions de la forêt. Ces paramètres sont des paramètres physiques portant sur les arbres, le peuplement, le sol, le climat et la localisation (par rapport aux moyens d'accès existants ou possibles).

La plupart des paramètres concernant l'arbre et le peuplement sont généralement estimés par des procédés d'échantillonnage au sol et de nombreux renseignements physiques sur le terrain peuvent également être réunis durant l'inventaire. Il est important que les données de l'inventaire soient rassemblées de manière que les résultats puissent être appliqués aux unités d'exploitation. Leur précision dépend de l'intensité de sondage de l'inventaire par rapport à la taille de l'unité d'exploitation. Les données obtenues par sondage à faible intensité sur une grande surface peuvent donner de bonnes estimations pour l'ensemble de cette surface, qui ne sont cependant en général pas assez exactes pour permettre d'évaluer les coûts d'exploitation sur une zone plus petite. En dehors de l'intensité de sondage il faudra tenir compte de la distribution de l'échantillon. Un sondage systématique à un degré est souvent jugé utile à cet égard car il permet de changer ultérieurement les limites des unités d'exploitation.

622.1 Paramètres se rapportant à l'arbre et au peuplement

Ceux-ci sont estimés dans tous les inventaires forestiers et sont principalement les nombres de tiges et les volumes bruts ou nets correspondants, par classes de diamètre (ou de hauteur) et par essences ou groupes d'essences. Les estimations moyennes et totales devront

être données avec une précision suffisante au niveau des unités d'exploitation si on doit s'en servir pour définir l'accessibilité. Ces paramètres comprennent également les estimations de la qualité (voir sous-chapitre 4) nécessaires pour calculer les pourcentages des nombres d'arbres, par essences (ou groupes d'essences) et par classes de dimension, qui ne seront pas abattus du fait de leurs défauts visibles, et également pour estimer les volumes exploitables par le moyen d'une étude de récolement.

Les résultats de l'étude de récolement (voir sous-chapitre 5) fournissent également des données physiques indispensables à l'étude d'accessibilité. Puisqu'ils sont relevés par unités d'exploitation, on peut calculer le volume à prévoir pour chaque phase de l'exploitation (abattage, débardage et camionnage).

D'autres paramètres intéressant l'arbre et la station sont importants pour évaluer l'accessibilité mais sont difficilement quantifiables, telles la densité du sous-bois ou l'importance des ramifications des arbres.

622.2 Paramètres liés au terrain et au sol

Les caractéristiques principales du terrain et du sol qui ont une influence sur l'accessibilité de la forêt ont été reprises dans la proposition de l'IUFRO pour un système international de classification du terrain et dans la note de la FAO: ''liste indicative des paramètres à prendre en considération pour la description quantitative et qualitative des conditions d'exploitation forestière''. Ces caractéristiques sont:

a) paramètres liés au terrain

- type de terrain qui peut être décrit par des facteurs géomorphologiques tels que les variations de relief, le réseau hydrographique régulier ou irrégulier, la fréquence des cours d'eau, les affleurements rocheux, etc.;

par
par son relief et ses dimensions;

- largeur et profondeur des rivières et des ruisseaux;

- pentes (de plus de 50 mètres de long);

- inégalités du terrain définies par la fréquence des obstacles qui ont un relief de plus de 0,3 mètre;

- microtopographie définie par la fréquence des ravins et des pentes de moins de 50 mètres;

- zones inondables avec indication de la durée et de la fréquence des inondations;

b) paramètres liés au sol

- portance à l'état humide, pour les véhicules tout terrain;

- possibilité de construction et d'entretien de routes en fonction de la profondeur et de la texture du sol et de la présence de pierres à la surface 1/;

- érodibilité, considération importante surtout pour les coûts de construction et d'entretien des routes.

1/ Les équipes d'inventaire relèveront aussi les dépôts de gravillons et les carrières situées hors des unités d'échantillonnage, surtout s'il y en a peu.

622.3 Paramètres liés au climat

Les paramètres climatiques utiles pour estimer les coûts se rapportent aux éléments suivants:

- pluviométrie, quantité et distribution des pluies annuelles; pluviométrie maximale par heure et par jour;

- débit hydrique et ses variations;

- températures;

- ensoleillement avec les caractéristiques de la longueur de l'ensoleillement pendant la saison des pluies.

622.4 Paramètres liés à la localisation et à l'accès

Ceux qui sont utiles pour évaluer l'accessibilité sont principalement:

- les routes et la distance des centres de consommation des bois (scieries, villes, zones fortement peuplées, ports);

- les données concernant les voies de communication existantes et potentielles à l'intérieur des forêts; densité du réseau et distances de transport par types, catégorie et charge maximum (l'estimation de la longueur des routes peut se faire avec une grille de lignes perpendiculaires et en utilisant le théorème de Buffon).

623 Paramètres socio-économiques. Ces paramètres sont absolus et sont déterminés par les lois et l'économie nationale. On en a besoin dans les formules de coût pour établir le coût des facteurs de production par unité de temps. On peut distinguer ici trois groupes de données: la main-d'oeuvre, le matériel et autres facteurs.

Main-d'oeuvre: information sur la disponibilité en main-d'oeuvre et les qualifications, les salaires et avantages; les facilités de transport et de campement, le nombre de jours ouvrables par an, le nombre d'heures réelles de travail par jour, etc.

Equipement: coûts de fonctionnement comprenant prix d'achat, droits de douane, le coût de l'essence, le service, etc.

Autres données: lois sur le transport, tarifs ferroviaires, règlements d'exploitation, composition de l'entreprise, etc.

63 Quantification et/ou classification des paramètres d'accessibilité

631 Paramètres liés à l'abattage. Pour l'abattage, outre les caractéristiques principales de l'arbre, des paramètres tels que la longueur du houppier ou toute autre indication sur l'importance des ramifications, la difficulté de l'ébranchage, etc., sont utiles à connaître. La pente et les autres conditions du terrain sont également importantes. Le tableau suivant donne une quantification combinant la forme et la qualité des arbres d'une part et le terrain et la végétation de la zone d'abattage d'autre part. Le coefficient reflète l'influence des conditions ''normales'' sur la production.

Facteurs de correction à appliquer si les conditions de travail ne sont pas normales

Terrain et végétation de la zone d'abattage	Forme et qualités des arbres		
	Arbres hauts et bien formés; peu de dégâts à l'abattage	Forme et longueur normales; dégâts moyens	Arbres petits et mal formés; dégâts importants
Terrain en pente forte (plus de 30%) ou terrain marécageux et/ou obstacles sérieux pour l'abattage (sous-bois, etc.)	0,9	0,8	0,6
Conditions moyennes normales	1,2	1,0	0,8
Terrain uniforme ou légèrement ondulé, sols bien drainés, pas de sous-bois important ou d'autres obstacles à l'abattage	1,5	1,2	1,0

632 Paramètres liés au transport et la construction des routes

632.1 Les classifications suivantes concernant la pente et l'inégalité du terrain sont extraites de la proposition de système international de classification des terrains de l'IUFRO et sont données en exemple et non comme modèles à adopter dans tous les cas.

632.11 Pente

La pente est définie par son gradient (a), sa longueur (b) et son exposition (c).

Les pentes qui ont une longueur de plus de 50 mètres sont dites majeures. Celles qui ont des longueurs de 10 à 50 mètres sont dites mineures comme dans le cas de petites vallées et de petites collines. Les dénivellations de moins de 10 mètres de longueur sont des ''inégalités du terrain''.

a) Gradient

Le gradient moyen est donné en pourcentage. On a adopté les classes suivantes:

1. 0 - 5%
2. 5 - 10%
3. 10 - 20%
4. 20 - 33%
5. 33 - 50%
6. >50%

On peut utiliser des classes intermédiaires, si cela est nécessaire. La pente est:

1. positive, si l'on doit remonter pour atteindre la route d'accès
2. négative, si l'on doit descendre pour atteindre la route d'accès

On pourra compléter la description en enregistrant la pente maximum.

b) Longueur de la pente

On donne la longueur des pentes majeures en mètres dans les classes suivantes:

Pentes mineures

1. 10 - 50 m

Pentes majeures

2. 50 - 100 m
3. 100 - 200 m
4. 200 - 400 m
5. 400 - 600 m
6. 600 - 800 m
7. 800 - 1 000 m
8. 1 000 - 1 200 m
9. 1 200 - 1 500 m
10. >1 500 m

On peut obtenir, par regroupement, des classes d'amplitude plus grande. Il peut y avoir des pentes mineures à l'intérieur d'une pente majeure.

c) Exposition de la pente

L'exposition est notée comme une direction à la boussole de la manière suivante:

1. Nord (N)
2. Nord-Est (NE)
3. Est (E)
4. Sud-Est (SE)
5. Sud (S)
6. Sud-Ouest (SO)
7. Ouest (O)
8. Nord-Ouest (NO)

632.12 Inégalités du terrain

On décrit l'inégalité du terrain, indépendamment de la pente, d'après la présence d'obstacles tels que les micro-variations de la surface, les rochers, les cailloux, les souches, les trous, les creux, etc., de plus de 30 cm de hauteur ou de profondeur.

On définit les inégalités par la fréquence des obstacles (a), qui sont au besoin ventilés par types et dimensions (b).

a) Fréquence des obstacles

On utilise les classes suivantes:

1. terrain très libre; la distance moyenne entre les obstacles est supérieure à 5,0 m; la distance minimale est supérieure à 3,0 m;

2. terrain libre; la distance moyenne entre les obstacles est supérieure à 5,0 m; la distance minimale est inférieure à 3,0 m;

3. terrain obstrué; la distance moyenne entre les obstacles est comprise entre 5,0 et 3,0 m;

4. terrain très obstrué; la distance moyenne entre les obstacles est inférieure à 3,0 m;

5. terrain avec rochers et éboulis

5. terrain avec précipices et ravins.

Par distance entre obstacles, on entend la distance de terrain libre entre les extrémités des obstacles.

b) Ventilation des obstacles par types et dimensions

Hauteur ou profondeur des obstacles, mètres	Nombre de types différents d'obstacles					Nombre total d'obstacles par hectare
	Cassures et crevasses	Rochers et cailloux	Trous et creux	Souches	Autres	
0,3 - 0,5 0,5 - 1,0 1,0						

La fréquence des types d'obstacles s'exprime par des nombres entiers. Pour les ''cassures et crevasses'' les classes de hauteur/profondeur peuvent être subdivisées.

632.2 Problèmes touchant l'estimation de la pente

Les pentes plus importantes pour les coûts d'exploitation sont celles de plus de 50 mètres (pentes ''majeures''). Dans l'inventaire sur le terrain, on ne peut, en général, mesurer les pentes que sur des distances plus petites (souvent 10 à 20 mètres). On peut estimer les pentes moyennes de plus de 50 mètres par échantillonnage sur photographies aériennes ou sur de bonnes cartes topographiques à grande échelle (supérieure au 1/25 000). La comparaison entre la mesure des pentes sur le terrain et sur photographies ou cartes montre que l'on surestime l'importance des pentes fortes sur le terrain, car une partie d'entre elles sont courtes.

Quelle que soit la classification adoptée pour les pentes, il faut prévoir des limites de classe à 50% (pente maximum praticable actuellement par un tracteur) et si possible aussi 70% (difficultés pour la construction de routes).

On recommande la classification suivante pour les longueurs des pentes supérieures à 50%:

50 mètres - 300 mètres

300 mètres - 700 mètres

>700 mètres

632.3 Autre exemple de classification des inégalités du terrain

Le tableau suivant nous donne une autre méthode d'enregistrement des inégalités du terrain et d'autres facteurs difficiles à mesurer. On affecte subjectivement à chaque paramètre une classe de difficulté, de 1 à 5, la classe 3 étant considérée comme ''normale''. La somme E des cotations de difficultés ainsi déterminées est l'expression de leur influence combinée sur l'extraction des bois, et cet indicateur est utilisé dans la formule du coût de cette opération.

Classe de difficulté	Paramètre				
	Surface	Ravins et marécages	Portance du sol	Sous-bois	Chablis etc.
1	libre égale 0	néant 0	bon 0	néant 0	néant 0
2	2	1	1	0	0
3	4	2	2	1	1
4	6	4	3	2	1
5	très inégale, nombreux cailloux et rochers 10	très fréquents 8	très faible 6	très dense 4	très fréquents 2

La somme Σ des points du tableau donne E, en appliquant les conversions suivantes:

E	1	2	3	4	5
Σ	0-5	6-11	12-17	18-23	23-30

CHAPITRE VI

RELEVE ET TRAITEMENT DES DONNEES EN INVENTAIRE FORESTIER

CHAPITRE VI

RELEVE ET TRAITEMENT DES DONNEES EN INVENTAIRE FORESTIER

1 Introduction

Le relevé et le traitement des données peuvent être considérés comme des étapes essentielles entre la préparation et la réalisation d'un inventaire forestier. On ne peut exploiter par photo-interprétation ou autrement les données de base recueillies sur le terrain au cours de l'inventaire sans les avoir enregistrées, recensées et condensées auparavant. De plus, la procédure de traitement devra être adaptée aux besoins et à la conception de chaque inventaire particulier. Il est donc capital de considérer, dès le début de la préparation, le traitement des données comme une partie intégrante de l'inventaire forestier.

Il faut particulièrement tenir compte de l'enregistrement et du traitement des données au début de la préparation d'un inventaire forestier, car les moyens en matériel et en personnel dont on dispose pour le traitement ou le coût de ce traitement peuvent avoir une influence importante sur le dispositif, l'intensité et le calendrier de l'inventaire en sa totalité. L'information recherchée, le temps et l'argent disponibles étant connus, le traitement des données doit être considéré comme un facteur limitant qui influence le choix de la méthode d'inventaire. D'une façon générale, plus la méthode d'inventaire sera simple, moins il faudra de temps et d'argent pour le traitement des données. Bien que la phase de traitement soit un outil d'inventaire plutôt qu'un élément déterminant, il ne faut pas sous-estimer son influence sur la réalisation de l'inventaire.

Le domaine du relevé et du traitement des données est très complexe et en plein développement. C'est pourquoi le présent chapitre ne doit être considéré que comme un guide général pour le choix et l'utilisation des méthodes adaptées à un inventaire donné. Le sous-chapitre ''Relevé des données'' se borne à exposer les conditions de relevé des données et les méthodes à utiliser pour les différents type de données d'inventaire. Dans le sous-chapitre ''Traitement des données'', on étudie les différentes phases et les différents types de traitement et on donne quelques indications pratiques valables pour les inventaires dans les régions tropicales.

2 Relevé des données

21 Conditions générales

Avant d'établir un document de relevé 1/, il faut envisager soigneusement les données particulières à enregistrer. Comme les résultats du traitement ne peuvent évidemment être ni meilleurs ni plus fiables que les données d'entrée on s'efforcera d'améliorer la qualité des données à relever. L'objectivité et la comparabilité sont à cet égard primordiales. Puisque les données d'inventaire sont, en général, relevées par des personnes différentes et dans des conditions différentes, on évitera tout risque d'influence humaine sur les données elles-mêmes. Les instructions doivent exclure tout élément de jugement personnel. On demandera, dans la mesure du possible, une évaluation quantitative objective des données. Lorsqu'on ne peut éviter un codage (classification, par exemple, du couvert en classes de densité) les instructions doivent définir clairement les critères à appliquer pour le codage. Bien qu'une stratification fine d'une variable donnée permette une classification précise, les résultats risquent d'être moins précis que ceux obtenus à partir de mensurations, car le codage dépend parfois d'un jugement personnel.

1/ ''document de relevé'': tout formulaire préparé sur lequel on notera les données (exemple: feuilles de comptage). L'enregistrement peut se faire soit manuellement, soit automatiquement à l'aide de procédés spéciaux (voir paragraphe 23).

Afin de minimiser le biais humain, les paramètres à enregistrer devraient, dans la mesure du possible, être mesurables (variables continues). Pour les autres variables, on aura recours à un système de classification général (ou de codage) qui permette un classement aussi objectif que possible. On cherchera à obtenir des données homogènes qui soient comparables d'une ''unité de relevé'' 1/ à l'autre.

Les données doivent être inscrites comme elles sont mesurées et aucun traitement ne doit être fait pendant la phase de relevé. Si, par exemple, on a besoin du diamètre moyen de chaque arbre pour les calculs ultérieurs et que ce diamètre moyen est évalué à partir de deux mesures directes ou plus, on relèvera seulement les mesures directes, et le diamètre moyen sera calculé ensuite. De même, lorsqu'on mesure les diamètres, il vaut mieux enregistrer les mesures réelles plutôt que les classes de diamètre correspondantes. Cela élimine l'erreur possible venant de l'affectation des diamètres mesurés aux classes. D'une façon générale, plus les paramètres et la méthode de relevé sont simples, plus les résultats correspondants sont exacts.

C'est ainsi que l'une des tâches les plus importantes est de concevoir un modèle de feuille de relevé simple et clair, facile à manier sur le terrain et facile à remplir. Ce modèle doit viser à faciliter d'abord le relevé des données et secondairement leur traitement. En effet, le relevé est en général plus coûteux et plus difficile que le traitement. L'aspect pratique est donc une condition générale importante du relevé des données.

Avant de commencer le relevé, il faut se familiariser avec les conditions de travail et avec les données elles-mêmes. Il est très utile tout d'abord d'adapter le relevé au personnel qui en sera chargé; si celui-ci est très peu qualifié et expérimenté, il faut choisir une méthode simple; par exemple, pour mesurer les diamètres, on peut utiliser des rubans spéciaux sur lesquels seules les classes de diamètre sont portées. Les conditions du milieu, telles que le temps, le terrain ou l'épaisseur du sous-bois, peuvent aussi influencer ce travail de relevé. Ainsi, quand il pleut il peut être nécessaire d'utiliser du papier imperméable pour les feuilles de pointage.

22 Conditions particulières

221 En fonction du type de données. Une classification pratique des types de données d'inventaire forestier est la suivante:

- informations obtenues par interprétation des images de télédétection;
- informations sur les placeaux (station, sol et accessibilité);
- pointage des arbres par essences et classes de diamètre;
- mensuration des arbres, sur pied ou abattus;
- informations sur la qualité du bois sur pied.

1/ Pour la définition d'une unité de relevé, voir le paragraphe 412 du chapitre III.

A partir de l'expérience acquise lors de nombreux inventaires de zones tropicales, on retient généralement quatre types de relevés de base pour chaque unité sur le terrain:

Pour l'unité de relevé:

Type de relevé N° 1: cette feuille a pour objet d'identifier l'unité de relevé; elle donne toutes informations sur le placeau lui-même, par opposition au pointage par arbre. Ce sont, par exemple:

Identification du placeau			Description du peuplement				Données d'accessibilité				
(1)	(2)	(3)	...								(m)

Pour le pointage des arbres: en général, un seul des trois types suivants est utilisé, dans une unité donnée, avec le relevé N° 1.

Type de relevé N° 2: on indique le nombre d'arbres dans un tableau où les lignes correspondent aux essences et les colonnes aux classes de diamètre:

Code essences	Classes de diamètre								
	1	2	3	4	5	6	7	.....	n
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)					(m)

Type de relevé N° 3: on enregistre les paramètres de l'arbre dans un tableau où chaque ligne représente un arbre et chaque colonne un paramètre

Arbre n	Paramètres de l'arbre			
	diamètre à hauteur d'homme	hauteur	code essence	etc.
(1)	(2)	(3)	(4)	.....

Type de relevé N° 4: on énumère à la file les arbres par essence et diamètre:

	code essences	diamètre à hauteur d'homme	code essences	diamètre à hauteur d'homme	code essences	diamètre à hauteur d'homme	etc.
Col.	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	.....

Un inventaire donné peut comporter différentes combinaisons de types de relevés. Dans un sondage en grappe, par exemple, un relevé arbre par arbre peut n'être nécessaire que dans une unité sur quatre, alors que, dans les trois autres, on se contentera du type de relevé 2 ou 4 selon la procédure de traitement choisie.

Pour les données relevées au bureau, on peut employer des méthodes plus élaborées et adopter un système conçu de façon à faciliter le traitement, car le risque d'erreur est alors sensiblement réduit.

222 En fonction du traitement. La méthode de traitement choisie a peu d'influence au niveau du relevé. Dans tous les cas les données seront écrites clairement et simplement. Si elles sont mises sur cartes perforées en vue d'un traitement électronique par ordinateur, il est préférable de les ranger suivant la séquence de la perforation mais ce n'est pas indispensable, car le perforateur peut facilement adapter son plan de perforation. Dans le cas d'une exploitation manuelle, on cherchera à ranger les données de telle façon que l'exploitation puisse commencer immédiatement sans devoir perdre de temps pour trier et reclasser les données, Dans ce cas, on évitera la quatrième méthode de pointage des arbres car, quand on se contente de relever les uns après les autres les codes essences et les diamètres, il faut ensuite procéder à un laborieux reclassement des données, et cela complique le travail. Dans le cas de données qualitatives, il faut déterminer la clef de codage de tous les paramètres avant de commencer le relevé.

23 Principaux types de relevés

Les méthodes de relevé varient avec les méthodes de traitement. Le type le plus simple, qui peut être exploité manuellement ou sur ordinateur utilise des documents écrits à la main sur le terrain. La feuille de renseignements sur les placeaux (type de relevé n° 1) doit toujours contenir les points suivants:

1. Description du travail: date, personnel sur place, date du début et de la fin du relevé sur le terrain.

2. Identification du placeau: unité d'inventaire, unité d'échantillonnage, placeau ou point de l'unité d'échantillonnage, etc.

3. Critères de la parcelle: description du peuplement, milieu, accessibilité, réseau tier.

Afin de faciliter le contrôle rapide et l'identification au bureau, ces groupes de données doivent être clairement distingués dès la conception même de la feuille de relevé. Si elles doivent être transcrites sur cartes perforées pour l'ordinateur on pourra indiquer les numéros de colonnes sur la feuille de relevé. La quantité d'information enregistrée sur la feuille peut dépasser les 80 colonnes d'une carte perforée (voir paragraphe 311).

Le transfert des données des documents sur cartes perforées est un facteur important du coût total du traitement. Pour l'éviter, on utilise de plus en plus des documents d'une autre forme que les relevés écrits à la main.

a) Cartes à 40 colonnes (''Port-a-punch'' cards)

Les données sont enregistrées directement sur des cartes perforées à 40 colonnes à l'aide d'un système spécial portatif. Elles sont ensuite lues directement par l'ordinateur et stockées sur disques ou bandes. Cette méthode, qui a été utilisée avec succès dans l'Inventaire forestier national suédois, nécessite un personnel qualifié sur le terrain. Des essais en forêt tropicale sous des conditions difficiles n'ont pas donné de bons résultats.

b) Feuilles et Cartes de marques

Le principe de cette méthode est de marquer à l'aide d'un procédé spécial (crayon ou marqueur) les données dans les positions prédéterminées sur des cartes ou des feuilles, qui seront ensuite interprétées par un lecteur optique électronique. L'avantage d'utiliser des feuilles plutôt que des cartes est que l'on peut enregistrer plus de données, car le nombre de données qui tient sur une carte est, en général, limité. Cette méthode a été essayée dans un inventaire forestier tropical mais sans succès parce que, les unités étant grandes, chacune comprenait trop d'essences et d'arbres pour pouvoir être relevée sur un seul document. Cependant, dans certains cas tels que des inventaires de plantations où les conditions du milieu sont favorables, ces méthodes devraient réussir.

c) Documents écrits à la main pour lecture optique

Une innovation relativement récente permet la lecture des documents écrits à la main par une machine optique à plusieurs fonctions. La lecture se fait par un système de balayage lumineux électronique, par lequel chaque caractère est analysé et, dans la plupart des cas, identifié par un ''rayon lecteur'' qui identifie par un cheminement en spirale les contours de chaque caractère, ce qui permet l'identification.

Cette méthode, utilisée avec succès dans des inventaires forestiers en Allemagne de l'Ouest, nécessite un ordinateur équipé d'un lecteur optique qui analyse et enregistre les données sur disques ou bandes. D'autre part, l'inscription sur le terrain doit se faire avec soin, suivant des règles définies d'écriture, et chaque caractère doit être écrit à l'emplacement prévu sur la feuille de relevé. En raison de la fréquence des interprétations erronées, il faut vérifier toutes les données en ordinateur au moyen d'une routine spécialement conçue pour localiser les erreurs. L'inconvénient majeur de cette méthode, en inventaire forestier tropical, est sa complexité.

D'autres méthodes utilisables pour enregistrer les données d'inventaires forestiers sont les suivantes: bandes de machines à calculer pour les données relevées au bureau (photo-interprétation) ou procédés semi-automatiques comme le compas à enregistrement automatique, décrit par Badan et qui enregistre directement les mesures de diamètre. Dans certains cas, lorsqu'il faut déterminer l'accroissement à l'aide de tarières (dans des inventaires de plantations en zones tempérées), on peut utiliser la machine d'Eklund pour compter les cernes annuels. A l'aide d'un certain nombre d'instruments, l'épaisseur du cerne annuel évalué sous microscope est transférée automatiquement sur cartes perforées ou bandes de papier, car cet appareil peut être relié à une perforatrice.

Ces méthodes ne sont applicables que lorsqu'on dispose de personnel qualifié et des machines appropriées. Dans les inventaires forestiers tropicaux, ce n'est généralement pas le cas et la meilleure méthode de relevé paraît être le document rempli à la main sur le terrain, quel que soit le système de traitement ultérieur.

24 Aspects pratiques du relevé

241 Organisation sur le terrain. Dès qu'un prototype de document de relevé est réalisé, il faut vérifier, lors de la phase préparatoire de l'inventaire, s'il est pratique et maniable.

On doit aussi vérifier les instructions pour le travail sur le terrain. Les points suivants doivent être détaillés:

- composition de l'équipe d'inventaire sur le terrain;

- responsabilités de l'équipe en matière de relevé des données;

- données à relever;

- façon de reporter les données sur les feuilles.

Les instructions de terrain devraient aussi donner des détails sur la manière de travailler à l'intérieur de l'unité de relevé, sur l'ordre dans lequel il faut procéder au comptage des essences et des diamètres, sur le procédé de vérification lors du pointage et sur toute autre information pouvant faciliter le rassemblement des données.

242 Préparation pour un traitement futur. Avant tout traitement des données relevées (par exemple, transcription sur cartes perforées pour l'ordinateur ou exploitation manuelle), les deux opérations suivantes doivent être réalisées:

a) Tri manuel des documents de terrain pour les mettre dans un ordre logique. C'est là une première vérification de la cohérence des documents. On peut ainsi vérifier qu'aucun document d'une unité d'échantillonnage ne manque.

b) Vérification visuelle des données afin de détecter des incohérences qui pourront être corrigées par le personnel de terrain si on ne peut pas le faire au bureau.

3 Traitement des données

31 Phases du traitement des données

311 Saisie des données. Un des problèmes principaux du traitement, surtout du point de vue financier, est le classement des données suivant un ordre utilisable ultérieurement pour le traitement. L'ordinateur exige notamment des méthodes pratiques et efficaces de saisie des données: il faut que celles-ci soient organisées sous une forme lisible par l'ordinateur. On évitera dans la mesure du possible toute transcription manuelle de données entre le relevé et le traitement. En plus des méthodes décrites ci-dessus (voir paragraphe 23), il existe deux méthodes principales de saisie des données pour transférer les données de base des feuilles de terrain à l'ordinateur.

a) Rubans de papier perforés (ou poinçonnés)

Bien que leur importance diminue en inventaire forestier, ces rubans (qui sont utilisés, par exemple, avec les télétypes) sont particulièrement bien adaptés au transfert d'une quantité importante de données homogènes, telles que de longues listes de comptage. Ces rubans s'adaptent également bien à la saisie automatique des données, comme dans le cas de relevés climatologiques continus sur le terrain. Mais le transcodage des données sur bandes magnétiques est ensuite fastidieux; c'est là un inconvénient du système. Pour cela il faut des équipements électroniques spéciaux, et une option ''format libre'' 1/ que seuls certains centres de traitement peuvent offrir.

b) Cartes perforées à 80 colonnes

La carte perforée classique est formée d'une série de rangées et de colonnes que l'on perfore à des emplacements prédéterminés en utilisant des perforatrices spéciales dont le clavier ressemble à celui d'une machine à écrire.

Les erreurs de perforation peuvent être réduites, sinon supprimées, en utilisant des machines vérificatrices, sur lesquelles on répète la perforation des données initiales.

Bien que les variations de température et d'humidité puissent faire varier les dimensions et le poids des cartes et les faire gauchir (le degré hygrométrique des chambres de stockage des cartes ne doit pas dépasser 65 pour cent), elles sont actuellement, dans les pays tropicaux, le meilleur procédé de saisie et de transfert des données car la plupart des centres de traitement ont des lecteurs de cartes perforées.

De plus, les cartes perforées de taille standard sont adaptées aux différentes marques d'ordinateurs. Comme nous l'avons déjà vu, les données sont perforées sur les cartes à des endroits déterminés par les instructions de perforation des cartes, qui comprennent notamment les règles suivantes utiles pour éviter les erreurs:

i) N'utiliser qu'une carte par unité logique de relevé. L'unité logique est, en informatique, la plus petite partie d'un fichier qui puisse être définie, compte tenu de la structure logique des données enregistrées. Ainsi, pour les 4 types principaux de relevé du paragraphe 221, les unités logiques sont respectivement:

1. l'information sur un placeau (et un seul);

2. l'information sur un arbre (et un seul);

1/ L'utilisation des ''formats libres'' nécessite des machines à software perfectionné qui n'ont pas besoin de la définition du format pour chaque entrée.

3. le nombre d'arbres par classe de diamètre d'une essence;

4. le code de l'essence et le diamètre de tous les arbres recensés dans une unité de relevé.

Si, notamment dans le dernier cas, l'unité logique ne tient pas sur une seule carte, on pourra utiliser des cartes complémentaires à condition que ceci soit signalé sur la première carte par un code.

ii) Le nombre de colonnes à réserver par paramètre (élément d'information ou rubriques de chaque unité logique) est déterminé par la plus grande valeur que peut prendre ce paramètre. Lors de la préparation des instructions de perforation des cartes, il faudra donc analyser chaque élément d'information.

iii) Les ''zones'' des données (à savoir le nombre de colonnes à réserver pour chaque élément d'information ou rubrique) peuvent se suivre sans colonne blanche intermédiaire. Toutes les rubriques, que les variables soient continues ou discontinues, doivent être perforées avec ''cadrage à droite'' 1/ dans leurs zones respectives sans indiquer les virgules décimales. Toutes les entrées d'une unité logique enregistrée dans une zone déterminée doivent avoir le même nombre de décimales. L'identification des décimales est faite plus tard par les instructions de format des programmes.

312 Apurement des données. L'apurement vise à produire, à partir du fichier de base, un fichier exempt de toute erreur de perforation ou d'autre incohérence. Les différentes phases de l'apurement sont les suivantes:

a) Tri des données

Cette opération est nécessaire parce que de nombreuses vérifications exigent que les données soient dans un ordre chronologique. On peut la faire manuellement, mécaniquement ou électroniquement. Pour le tri mécanique de cartes perforées à 80 colonnes à l'aide de trieuses spéciales il ne doit y avoir qu'une seule carte par unité logique. L'ordre du tri est donné par la méthode d'inventaire. Il faudra tout d'abord déceler et corriger les erreurs de codage en suivant la hiérarchie des codes. Des quantités plus importantes de données nécessitent un tri électronique qui utilise des routines de tri particulières, en général fournies par le fabricant de l'ordinateur.

b) Détection des erreurs par vérification

Nous pouvons considérer un fichier donné comme étant un tableau à deux dimensions de la forme:

$$\left[\left[X(I,J) \right]_{I=1}^{n} \right]_{J=1}^{m}$$

X = rubrique d'une unité logique
I = indice de la position de la rubrique X dans l'unité logique
J = indice de la position d'une unité logique dans le fichier
n = nombre de rubriques par unité logique (variables)
m = nombre d'unités logiques dans l'ensemble du fichier

Les vérifications peuvent être faites:

- sur chaque rubrique X (I,J) prise séparément;
- horizontalement, sur la relation entre deux ou plusieurs rubriques différentes d'une même unité logique (comme la relation entre X (1,J) et X (2,J) ou entre X (1,J), X (2,J) et X (5,J);
- verticalement, sur la relation entre des rubriques données d'unités logiques différentes (comme la relation entre X (I,2) et X (I,3).

1/ La valeur 355, par exemple, est dite ''cadrée à droite'' dans une zone à 6 chiffres si elle est perforée aux emplacements 4 à 6 de la zone, les emplacements 1 à 3 étant libres.

Les différentes vérifications, communes à toutes les procédures de traitement d'inventaires, peuvent être regroupées sous les types suivants:

- contrôle d'exhaustivité: il vise à vérifier si le fichier est bien complet, à chaque niveau d'accumulation des données. On vérifiera d'abord qu'il ne manque aucune unité logique dans une série de données (unité de relevé, unité d'échantillonnage, etc.) ni aucun élément d'information dans une unité logique (diamètre pour les arbres recensés, hauteur pour les arbres mesurés, etc.). On vérifie que les données à un certain niveau sont complètes en comparant le nombre cumulé des unités des niveaux immédiatement inférieurs (par exemple, arbres d'un placeau, ou placeaux d'une unité d'échantillonnage) aux nombres connus des unités de ce niveau. Ces totaux sont faits après le comptage sur le terrain (dans le cas de totaux d'arbres) ou donnés par le plan d'inventaire (nombre de placeaux par unité d'échantillonnage, nombre d'unités d'échantillonnage par bloc, etc.). Ces contrôles devraient être faits avant tout traitement de manière à éviter les sous- ou sur-estimations.

- contrôle de logique et de vraisemblance. Il comprend toutes les vérifications sur les rubriques elles-mêmes et sur les relations entre ces rubriques définissables logiquement d'après le dispositif de relevé et le plan de sondage. Ces contrôles sont les suivants:

  - vérification des perforations alphanumériques et numériques, colonne par colonne;
  - champ des variables continues en déterminant les valeurs minima et maxima entre lesquelles les variables peuvent se situer;
  - champ probable des variables discrètes (par exemple pour les codes essence ou pour les codes des types de végétation, etc.);
  - contrôle des relations horizontales et verticales dans le tableau décrit plus haut, en utilisant des comparaisons logiques entre les valeurs des paramètres. Dans le cas de traitement par ordinateur cela peut très bien se faire à l'aide d'''opérateurs logiques'' qui sont utilisables dans les langages perfectionnés de programmation (pour plus de détails voir n'importe quel manuel de programmation FORTRAN).

c) Etablissement de la liste des erreurs et correction

L'ordinateur imprime automatiquement la liste des erreurs détectées en même temps que la liste de toutes les rubriques des cartes correspondantes. La correction du fichier devrait être faite en collaboration étroite avec le responsable des travaux de terrain. Les cartes sont alors reperforées avec les corrections et remises dans le fichier à la place des enregistrements erronés sur les bandes ou les disques.

d) Apurement du fichier

Ce fichier ne devrait contenir que des données sûres organisées selon l'ordre prévu pour l'inventaire et il servira d'''entrée'' à toutes les opérations.

313 Elaboration des résultats. Cette phase du traitement d'un inventaire comprend toutes les opérations qui visent à déduire de ces données des résultats intermédiaires ou définitifs ou à préparer les données de base en vue d'un traitement ultérieur.

Les données doivent être triées en fonction du dispositif d'inventaire, du type d'informations recueillies sur le terrain (voir paragraphe 221), et des différentes classifications utilisées (strates et unités d'inventaire). A tous les niveaux de l'étude il faut calculer et présenter dans des tableaux à plusieurs entrées les estimations suivantes, par essences ou groupes d'essences et par classes de diamètre:

- moyennes par unité de surface (nombre d'arbres par ha, volumes par ha, etc.)
- totaux (surtout des volumes)
- erreurs d'échantillonnage.

On doit donc indiquer la position de chaque unité logique dans la hiérarchie de l'inventaire et pondérer en conséquence les données correspondantes pour faire les totaux partiels et généraux au niveau approprié. Les sorties finales des calculs aux différents niveaux de l'étude sont, en général, les suivantes:

a) Tableaux des nombres de tiges: nombre moyen de tiges par unité de surface et éventuellement totaux correspondants par strate et unité d'inventaire.

b) Tarifs de cubage: volumes unitaires des arbres par diamètre (tarifs de cubage à une entrée) ou plus souvent par diamètre et hauteur, par essence ou groupe d'essences.

c) Tableaux des volumes: volumes moyens par unité de surface et totaux correspondants, calculés à partir des tableaux de nombre de tiges et des tarifs de cubage ou à partir des volumes unitaires des arbres de l'échantillon.

d) Erreurs types ou erreurs d'échantillonnage correspondant à des niveaux de probabilité donnés, suivant la méthode de sondage.

Alors que les tableaux de nombres de tiges peuvent être établis d'après les données de base et le dispositif d'échantillonnage utilisé, il faut des études spéciales pour construire des tarifs de cubage valables. Avant l'analyse de régression finale, de nombreux autres calculs doivent être faits sur les données de base (qui sont, le plus souvent, des mesures d'arbres abattus): calculs des volumes individuels des abres échantillons, regroupement éventuel des données en différents groupes d'essence, représentation des nuages de points, transformation ou pondération des variables, vérification des modèles provisoires de régression et comparaison des lignes de régression correspondantes avec les données de base. Ceci fait, on peut développer les tarifs de cubage mathématiques définitifs et les tableaux correspondants (pour plus de renseignements sur les tarifs de cubage, voir le paragraphe 342 du chapitre V).

On peut faire les études de régression ou les calculs préalables sur des ordinateurs à mémoire de capacité limitée. Il est certainement préférable d'utiliser de gros ordinateurs car les calculs statistiques sont beaucoup plus faciles surtout si la masse des données est importante.

En dehors des calculs de base ci-dessus, tout inventaire forestier comprend des études spéciales en fonction des besoins particuliers, par exemple:

- expressions particulières des volumes (volumes ''nets'', ''industriels'' ou ''exploitables'') qui tiennent compte des données sur la qualité des arbres;
- estimation de l'accessibilité à partir des paramètres d'accessibilité (tels que la ventilation des surfaces en classes de pente, classes de portance du sol, etc.);
- études des coûts, y compris l'estimation des coûts d'exploitation et de transport. Ces renseignements supplémentaires nécessitent plusieurs réarrangements des données de base et le calcul de paramètres intermédiaires tels que les données sur la pourriture.

314 Présentation des résultats d'inventaire

314.1 Modèle de tableaux

Les résultats d'un inventaire forestier, quels que soient les surfaces et les paramètres, sont regroupés en tableaux. A la suite de la conférence des experts en inventaire

qui a eu lieu en 1967 au siège de la FAO, une série minimale de tableaux types a été recommandée; elle était reproduite dans la première édition du présent manuel. Ces tableaux, nécessaires dans tous les cas, sont donnés ci-dessous:

Tableau	Titre
VI-1	Récapitulation par classes actuelles d'utilisation des terres et forêts.
VI-2	Ventilation des superficies (éventuellement par zones écologiques), par classes d'inventaire et par unités administratives ou autres classes spécifiques.
VI-3	Superficies forestières actuelles par classes de propriété, par unités administratives ou autres classes d'inventaire.
VI-4	Tableau des nombres de tiges pour chaque classe d'inventaire.
VI-5	Superficies totales, volumes par unité de superficie et volumes totaux avec estimation de la précision suivant les unités et les classes d'inventaire.
VI-6	Volumes par classes d'inventaire suivant les classes d'utilisation et les essences ou groupes d'essences.
VI-7	Tableaux des volumes pour chaque unité administrative et chaque classe d'inventaire par classes de diamètre à hauteur d'homme.
VI-8	Accroissements nets annuels pour les classes d'inventaire par unités administratives.

Le schéma et l'explication de ces tableaux sont donnés dans les pages suivantes. Comme nous l'avons dit au Chapitre V, paragraphe 32, même dans les pays où le système anglo-saxon est utilisé, les résultats devraient être exprimés aussi en unités métriques.

Tableau VI-1

Récapitulation des surfaces par classes actuelles d'utilisation des terres et de forêts 1/

Classes de forêts et d'utilisation actuelle des terres	2/	2/	2/	2/
	Hectares			
I. Superficie totale des terres				
A. Superficie forestière				
1. Forêts naturelles				
a. Feuillus (mangroves non comprises)				
b. Conifères				
c. Mélangées feuillus-conifères				
d. Bambousaies pures				
e. Mangroves				
f. Palmeraies côtières et riveraines				
g. Provisoirement déboisées				
2. Forêts artificielles (subdivisions de a à g applicables)				
B. Autres superficies boisées				
1. Savanes, forêts claires				
2. Landes, forêts rabougries et arbustives				
3. Lignes d'arbres, brise-vent et rideaux-abris				
4. Autres zones				
C. Superficies non boisées				
1. Terres agricoles				
a. Cultures et pâturages améliorés				
b. Plantations				
2. Autres terres				
a. Stériles				
b. Parcours et prairies naturelles				
c. Marécages				
d. Landes, toundra				
e. Urbaines, industrielles et voies de communication				
f. Autres				
II. Eau				
TOTAL - Terre et Eau				

1/ Pour des détails sur cette classification, voir chapitre IV, paragraphe 23.

2/ Si l'on n'utilise pas la classification fondée sur les relations végétation-environnement comme celle des zones écologiques d'Holdridge - on n'aura qu'une seule colonne.

Tableau VI-2 1/

Ventilation des superficies 2/ (éventuellement par zones écologiques) par classes d'inventaire et par unités administratives ou autres classes spécifiques

Date de l'inventaire: .....

Zone écologique 2/	Classes d'inventaire 3/	Unités administratives ou autres classes spécifiques					Pourcentage du total
		1	2	3	etc.	Total	
		Superficie en hectares					
	1. ..... 2. ..... 3. ..... 4. etc. .. sous-total						
	1. ..... 2. ..... 3. ..... 4. etc. .. sous-total						
	1. ..... 2. ..... 3. etc. .. sous-total						
	Total						

1/ Ce tableau doit être rempli pour toute la zone inventoriée et éventuellement pour chaque unité d'inventaire.

2/ On distinguera les zones écologiques si le système Holdridge est adopté. Si on utilise un autre type de classification fondé sur les relations végétation-environnement, on précisera les classes correspondantes, sinon on n'en tiendra pas compte.

3/ Les classes d'inventaires sont déterminées en général par l'occupation actuelle des sols, la topographie, l'accessibilité, les conditions opérationnelles ou par toute autre stratification utilisée dans l'inventaire (voir chapitre IV, paragraphe 21). Si on utilise deux ou plusieurs classifications simultanées, le tableau sera divisé en conséquence.

Tableau VI-3 1/

Superficies forestières actuelles 2/ par classes de propriété, par unités administratives ou autres classes d'inventaire

Date de l'inventaire: .....

Classe de propriété 3/	Unités administratives ou autres classes 4/									Total	Pourcentage du total
	1			2			etc.				
	1	2	etc.	1	2	etc.	1	2	etc.		
1. Forêts publiques											
a. Forêts domaniales											
b. Autres											
2. Forêts privées											
a. Propriété des entreprises industrielles du secteur forestier											
b. Forêts de ferme											
c. Autres											
3. Propriété non encore déterminée											
4. Surface totale des forêts											

1/ Ce tableau doit être rempli pour toute la zone inventoriée et éventuellement pour chaque unité d'inventaire.

2/ Les superficies forestières sont celles du paragraphe I.A du tableau 1. On peut faire des tableaux semblables pour les ''autres zones boisées'' (Point I.B du tableau 1) si cela s'avère nécessaire ainsi que les tableaux correspondant à la somme de ces deux catégories.

3/ Classification du régime de propriété

1.a Comprend les forêts domaniales, celles des Etats, départements, cantons, etc., celles des établissements publics ou de la Couronne.

1.b Forêts qui appartiennent aux villes, aux villages et communes et à d'autres autorités locales. Elles comprennent toute forêt publique non indiquée ailleurs.

2.b Toutes les forêts propriété de particuliers, de familles ou de sociétés agricoles.

2.c Toutes les forêts privées non indiquées ailleurs, y compris les forêts appartenant à des institutions (religieuses, d'éducation, etc.).

3. Forêts dont la propriété est incertaine ou n'est pas encore établie.

Le cas échéant, les classes de propriété ci-dessus peuvent être ventilées selon les conditions locales particulières.

4/ On peut, si l'on veut, faire un tableau distinct par unité administrative.

Tableau VI-4 1/

Tableau des nombres de tiges pour chaque classe d'inventaire

Unité administrative (ou autre classe): ..... Date de l'inventaire: .....

Classe d'inventaire: ..... Surface en hectares: .....

ESSENCES OU GROUPES D'ESSENCES	CLASSE DE DIAMETRE EN CM 2/			
1				
2				
3				
4				
5				
6				
.				
.				
.				
.				
.				
.				
.				
.				
.				
TOTAL				

1/ Ce tableau doit être établi pour toute la zone inventoriée et éventuellement pour chaque unité d'inventaire.

2/ Indiquer les limites des classes pour chaque classe de diamètre, conformément au tableau du paragraphe 242.1, chapitre V.

Tableau VI-5

Superficies totales, Volumes 1/ par unité de superficie et Volumes Totaux 1/ avec estimation de la précision suivant les unités et les classes d'inventaire

UNITE D'INVEN-TAIRE	CLASSES D'INVEN-TAIRE 2/	SURFACE TOTALE		VOL. MOYEN PAR HA 1/		VOLUME TOTAL 1/	
		ha ou autres unités de surface	PRECISION au niveau P= 95 °/o ± °/o	en unités cubiques par unité de surface	PRECISION au niveau P= 95 °/o ± °/o	en unités cubiques	PRECISION au niveau P= 95 °/o ± °/o
1	1 2 3 etc. Total						
2	1 2 3 etc. Total						
etc.	1 2 3 etc. Total						
Total (superficie inventoriée)							

1/ Volume à définir dans une note.

2/ Voir la note 3/ du tableau VI-2.

Tableau VI-6

Volumes 1/ par classes d'inventaire suivant les classes d'utilisation et les essences ou groupes d'essences 2/

Unité administrative ou autres classes:

Date de l'inventaire:

Essence ou groupe d'essences par:		Classes d'inventaire								
Classe d'utilisation 3/	Nom des essences	1 (superficie ..)		2 (superficie ..)		3 (superficie ..)		etc. (superficie ..)		Total
		Par unité de surface	Totale	Par unité de surface	Totale	Par unité de surface	Totale	Par unité de surface	Totale	
		(Volumes en unités cubiques) 1/								
1	1									
	2									
	3									
	4									
	etc.									
2	1									
	2									
	3									
	4									
	etc.									
etc.	1									
	2									
	3									
	4									
	etc.									

1/ Volume à définir en note
2/ Voir la note (3) du tableau VI-2
3/ Exemple de ''classes d'utilisation'': 1: Essences actuellement commercialisées
2: Essences non encore commercialisées mais ayant une valeur potentielle
3: Essences sans valeur actuelle et de valeur potentielle inconnue

Chacune des essences n'apparaîtra que dans l'une des trois classes d'utilisation. On pourra subdiviser ces classes suivant les besoins locaux.

Tableau VI-7

Tableaux des volumes pour chaque unité administrative et chaque classe d'inventaire 1/ par classes de diamètre

Unité administrative (ou autre classe): ..... Date de l'inventaire:

Classe d'inventaire: ..... Surface en hectares:.....

ESSENCES OU GROUPES D'ESSENCES	CLASSE DE DIAMETRE EN CM 2/							
	Volumes		Volumes		Volumes		Volumes	
	Par unité de surface	Total	Par unité de surface	Total	Par unité de surface	Total	Par unité de surface	Total
1								
2								
3								
4								
5								
6								
.								
.								
.								
.								
.								
.								
.								
.								
TOTAL								

1/ Voir la note 3/ du tableau VI-2

2/ Indiquer les limites des classes pour chaque classe de diamètre conformément au tableau du paragraphe 242.1 du chapitre V.

Tableau VI-8

Accroissements nets annuels 1/ pour les classes d'inventaire 2/
par unité administrative

Classe d'inventaire	Unités administratives						Volumes totaux toutes unités
	1		2		etc.		
	volumes Par ha unité de surface	Total	volumes Par ha unité de surface	Total	volumes Par ha unité de surface	Total	
1. 2. 3. 4. 5. 6. etc.							
Toutes classes d'inventaire							

1/ a) Préciser comment ces chiffres sont obtenus et s'ils sont:
pour toutes les forêts considérées comme productives; ou
pour les forêts actuellement exploitées.

b) Indiquer si toutes les essences sont comprises (non commerciales, etc.)
Sinon, quelles essences sont comprises et quel pourcentage du volume total elles représentent.

c) Préciser si tous les âges et tous les diamètres sont compris; sinon quels sont les âges et/ou les diamètres considérés.

2/ Voir la note 3/, tableau VI-2.

314.2 Signification et précision

Les tableaux finals doivent donner des indications sur la fiabilité des résultats. En dehors des erreurs types qui devraient être données à chaque niveau de référence pour lequel les résultats définitifs sont calculés, il faut considérer attentivement la signification des résultats. Si, par exemple, à un certain niveau de stratification, le nombre d'unités d'échantillonnage d'une strate est trop petit, on omettra les tableaux des résultats correspondant à cette strate. Cependant, si pour une raison quelconque, il paraît utile de les publier, on indiquera toujours leur fiabilité relative en donnant la surface de l'échantillon correspondant ainsi que le nombre d'unités d'échantillonnage. Il est fortement recommandé de préciser ces points.

L'exactitude des différents résultats est en rapport avec leur erreur totale (y compris les erreurs d'échantillonnage et de mesure). L'exactitude des résultats aura le même ordre de grandeur que l'erreur totale estimée.

L'exactitude des chiffres de fréquence - nombre d'arbres par unité de surface d'une essence donnée ou d'un groupe d'essences et pour des classes de diamètres données- doit être compatible avec l'erreur totale prévue: si le nombre d'arbres à l'hectare est faible, l'erreur totale est souvent importante et l'estimation n'a qu'une valeur indicative. Il serait alors utile de le signaler par des symboles comme ceux utilisés par Guinaudeau (1973):

un blanc	(aucun chiffre)	: aucune donnée sur la case considérée
un tiret	(-)	: aucun arbre correspondant à la case considérée
astérisque	(*)	: au moins un arbre correspondant à cette case avec, cependant, le nombre d'arbres/ha inférieur à un chiffre donné (disons 0,1/ha)
chiffre		: nombre d'arbres/ha dans la case avec une précision de 0,1 arbre/ha.

Si on a aussi l'intention de donner les très petites valeurs, il vaut mieux faire un tableau des effectifs avec les nombres eux-mêmes d'arbres trouvés dans l'échantillon par essences ou groupes d'essences et par classes de diamètre.

La présentation de résultats d'inventaire avec une précision de beaucoup supérieure à l'erreur totale prévue est illusoire et trompeuse, en particulier lorsque ces résultats sont obtenus par ordinateur car les gens font plus confiance à l'informatique qu'au traitement manuel des données.

Il faut aussi veiller à ce que la précision soit homogène: si, par exemple, le volume moyen par ha est donné avec une précision de 0,1 m3 et la surface totale du bloc avec une précision de 100 ha, le volume total ne doit pas être donné au mètre cube près.

315 Système de traitement Un système de traitement au sens large devrait indiquer la séquence logique des diverses ''activités'' à prendre en considération dans les phases de préparation et d'élaboration. La figure VI-1 illustre cela sous la forme d'un organigramme dans le cas du traitement de données de terrain comprenant la mesure d'arbres échantillons en vue de l'élaboration de tarifs de cubage, les données sur les surfaces étant obtenues séparemment par photo-interprétation.

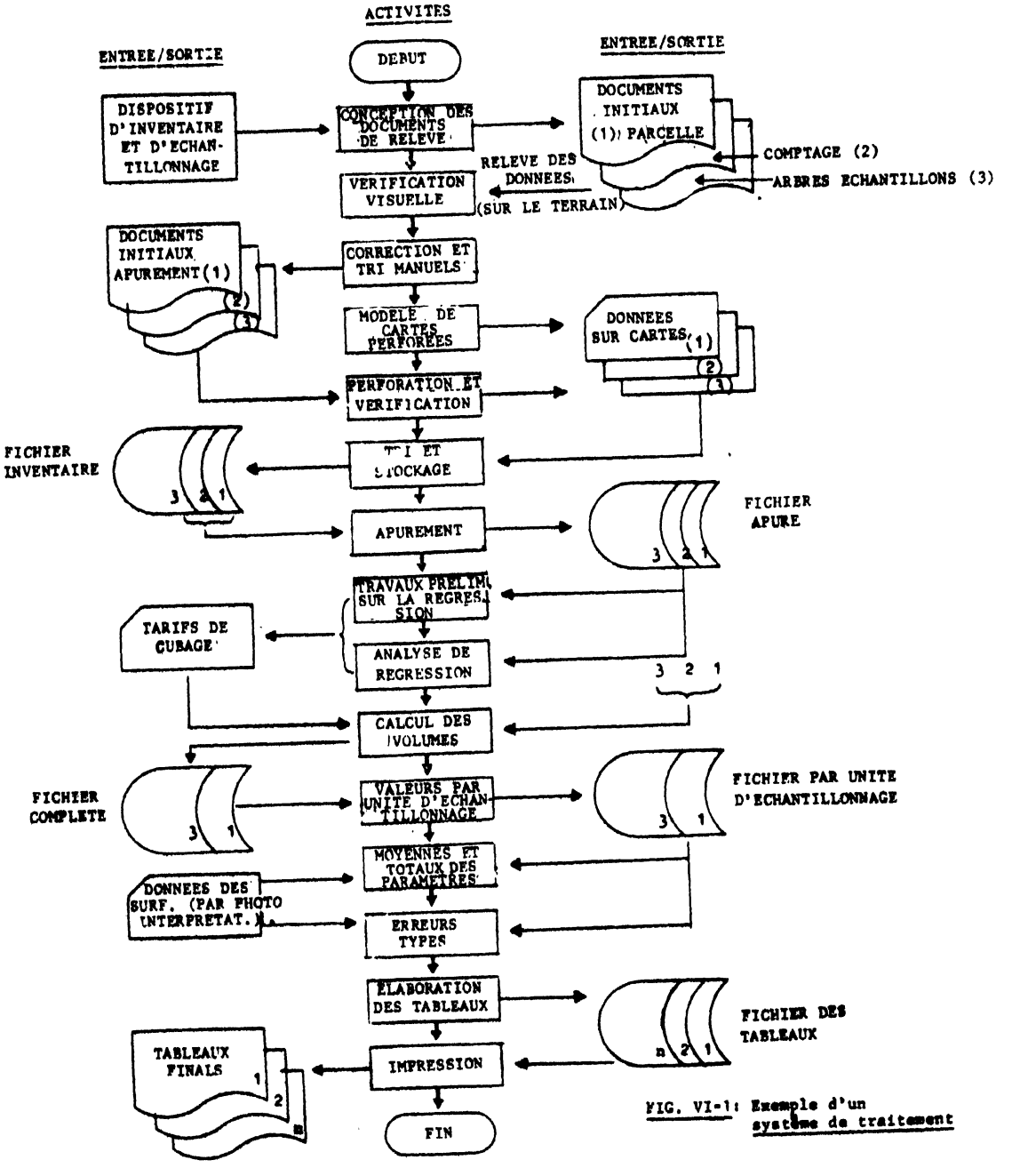


FIG. VI-1: Exemple d'un système de traitement

Il est utile de préciser le système pour les raisons suivantes:

a) les différentes étapes du traitement sont ordonnées logiquement;

b) le système clarifie la façon dont les résultats sont obtenus à partir des données de base et à l'aide des calculs correspondant au dispositif d'inventaire;

c) le système est un élément indispensable pour décider du type de traitement à utiliser;

d) c'est un outil nécessaire à l'estimation du temps et des coûts du traitement;

e) dans le cas de traitement électronique, c'est une source d'information essentielle pour aider l'analyste-programmeur dans l'élaboration des routines appropriées; le système est enfin très utile pour décider si le traitement doit être réalisé dans le cadre de l'inventaire lui-même ou s'il doit être confié à des sociétés sous-traitantes spécialisées dans l'informatique (voir les détails au paragraphe 332).

32 Choix du type de traitement

321 Traitement manuel. Le traitement manuel à l'aide de calculatrices de bureau, mécaniques ou électroniques non programmables peut, dans de nombreux cas, être la meilleure façon de traiter les données d'inventaire. Lorsqu'on décide du type de traitement il faut tenir compte des facteurs suivants:

- quantité et complexité des données (entrées)
- objectifs de l'inventaire
- facteurs temps et coût
- spécialistes disponibles et capacité des machines dans le cas de procédés plus perfectionnés (informatique).

Pour des inventaires à petite échelle, surtout si les conditions sont simples du point de vue forestier - par exemple, peu d'essences et peu de variation dans les formations forestières -, le traitement manuel des données peut être plus approprié que l'ordinateur, d'autant plus que ce dernier, avant même le véritable traitement, nécessite des études et des investissements préalables plus importants. De plus, le traitement manuel peut être préférable lorsqu'une quantité relativement faible de données doit être traitée et que les résultats doivent être obtenus assez rapidement. Il est évidemment inévitable même pour des inventaires importants si l'on ne dispose pas d'ordinateur ou de personnel compétent.

Si, d'autre part, on utilise l'informatique, le traitement manuel sera une étape nécessaire pour déterminer les différentes phases du traitement électronique et servira à analyser la procédure à adopter pour la programmation. Le calcul manuel est aussi indispensable pour contrôler le traitement électronique, en particulier lorsque celui-ci est confié en sous-traitance à des institutions extérieures. On vérifie les programmes en calculant manuellement une partie des résultats recherchés et en les comparant aux résultats donnés par l'ordinateur au moyen d'un jeu de cartes témoin. C'est là, souvent, l'unique méthode pour contrôler les erreurs de programmes.

Afin d'éviter autant que possible les erreurs dans le traitement manuel, il est capital de donner des instructions claires pour tous les calculs, à l'aide, par exemple, de modèles détaillés. Il est, de plus, très utile de faire tous les calculs sur des formulaires préétablis dans lesquels toutes les phases du calcul sont décrites, l'utilisateur devant suivre ces instructions. Un exemple est celui des formulaires mis au point par Dawkins (1968) au Commonwealth Forestry Institute d'Oxford, pour les calculs correspondant à des dispositifs statistiques classiques, et notamment les dispositifs d'échantillonnage courants (aléatoire pur et aléatoire stratifié). Des formulaires analogues peuvent être élaborés pour tout type de traitement manuel d'un inventaire forestier.

322 Traitement électronique (informatique) des données. Pour que le traitement électronique des données par un ordinateur numérique soit possible, il faut que l'expert en inventaire ait des notions d'informatique et en connaisse les avantages et les limites (pour plus de détails voir Loetsch, Zöhrer et Haller 1973, et la littérature citée). Les principes du traitement électronique par comparaison avec ceux du traitement manuel, sont les suivants:

	Eléments	Traitement manuel	Traitement électronique
1.	Instructions pour le calcul	règles de base du calcul	programmes dans des langages spéciaux (Fortran, Algol, Cobol, PL1)
2.	Données à traiter	données manuscrites ou dactylographiées sur les documents de relevé	documents entrées lisibles par la machine (par exemple, cartes perforées)
3.	Calculs	manuel	par l'ordinateur (unité centrale de traitement)
4.	Dispositifs auxiliaires	calculatrices de bureau, règles à calculer, tables (comme, par exemple, tables logarithmiques ou trigonométriques)	unité arithmétique et logique de l'ordinateur
5.	Résultats intermédiaires	calculs et composition des tableaux, etc.	stockage automatique dans l'Unité centrale (mémoire centrale) ou sur bandes, disques ou tambours, durant l'opération
6.	Résultats	Tableaux manuscrits ou dactylographiés, etc.	Impression directe des résultats (listings)

Les avantages de l'ordinateur par rapport au traitement manuel sont évidents:

- l'homme n'intervient que pendant la phase d'élaboration des règles de calcul (programmation). Une fois les programmes écrits et testés par les analystes - programmeurs en collaboration étroite avec l'expert inventaire, l'ordinateur effectue automatiquement tous les calculs, excluant toute erreur humaine;

- les opérations arithmétiques et logiques qui sont faites par l'homme ou par des procédés auxiliaires en traitement manuel sont ici préprogrammées et opérationnelles pendant la durée d'un seul passage 1/ en ordinateur;

- on peut stocker les tableaux et les résultats intermédiaires (à savoir, tarifs de cubage, tableaux des nombres de tiges ou des volumes) dans l'unité centrale et on peut adresser automatiquement chaque ''cellule'' 2/ à toute phase du traitement;

- tous les résultats peuvent être imprimés sous une forme définitive pour être inclus directement dans le rapport final.

1/ Par ''Passage'' ou ''Job'' on entend toute l'opération réalisée par l'ordinateur sous la commande d'un programme ou d'une série de programmes entre les signaux ''start'' et ''end'' du contrôle.

2/ Une ''cellule'' est la plus petite unité de l'ordinateur qui puisse être adressée et occupée directement par le programme.

Les inconvénients du traitement électronique sont les suivants:

- il faut des spécialistes pour écrire les programmes (analystes/programmeurs) et pour faire fonctionner la machine (opérateurs);
- le projet d'inventaire doit avoir accès à un centre de calcul valable;
- on doit transcrire avant le traitement les données de base sur des supports lisibles par la machine, ce qui entraîne une proportion appréciable du coût du traitement électronique.

Il est donc évident qu'on devra évaluer avec soin le traitement nécessaire pour un inventaire avant de décider quelle est la meilleure méthode de l'informatique ou du traitement manuel. Cependant, dans la plupart des inventaires forestiers on doit traiter une quantité énorme de données (par exemple 50 000 à 100 000 unités logiques) et faire différents types de ''sorties'' (tableaux des résultats). On choisira donc l'ordinateur dans la plupart des cas car il permet, après saisie des données sous une forme lisible par la machine et préparation des programmes, le traitement rapide des résultats sous une forme définitive. En outre, s'il faut introduire des modifications, un nouveau traitement des résultats est facile et peu coûteux. C'est le cas, par exemple, quand il est nécessaire de faire un nouveau découpage des surfaces par unités d'inventaire ou quand un nouveau groupement des essences ou une nouvelle série de spécifications pour les volumes est adoptée.

Les données de base stockées sur bandes, disques ou tambours peuvent être considérées comme une banque de données. Lorsqu'on a besoin de résultats supplémentaires sur la zone inventoriée ou certaines parties de celle-ci, on peut les traiter en utilisant la banque de données comme entrée. La facilité de stockage des données est d'une particulière importance dans le cas d'inventaires forestiers continus pour la mise à jour ou pour la prévision de la production ligneuse à partir de données enregistrées à différentes époques. Enfin, les banques de données sont également utiles pour l'élaboration de statistiques nationales ou régionales à partir des données de base de divers inventaires forestiers.

Si le traitement électronique doit être utilisé pour un inventaire forestier, il faut le décider au début de la préparation. L'inventoriste doit prendre en considération les étapes suivantes:

a) Lors de la phase préparatoire

1. Définition des résultats finals à obtenir par l'inventaire en fonction de ses buts.
2. Liste des paramètres de base à enregistrer aussi bien sur le terrain qu'à partir d'autres sources (à savoir photographies aériennes et cartes);
3. Elaboration du système (voir paragraphe 315).
4. Etude des disponibilités en ordinateurs de manière à choisir ceux dont la capacité suffit pour une partie ou tout le travail de traitement.
5. Conception des documents de relevé et des cartes perforées (ou autres documents lisibles par la machine).
6. Réalisation des organigrammes pour les programmes d'entrée et d'apurement par l'analyste-programmeur, en fonction des dispositifs d'inventaire et des systèmes de traitement, en collaboration étroite avec l'inventoriste.

b) Pendant l'exécution

7. Elaboration et vérification des programmes d'entrée et d'apurement par l'analyste-programmeur.

8. Perforation des données de base et vérification de celles-ci.

9. Apurement des données erronées en collaboration étroite avec les chefs d'équipes sur le terrain et stockage continu des données corrigées, sur bandes, disques ou tambours.

10. Organigrammes des programmes de calcul et de sortie, ainsi que pour la programmation et la vérification, en fonction du dispositif d'inventaire et du système de traitement.

11. Documentation sur le système de traitement des données.

c) Après la fin du rassemblement des données

12. Production des résultats finals (sorties)

13. Stockage sur bandes des données de base et des résultats intermédiaires (banque de données).

La principale tâche du spécialiste d'inventaire en ce qui concerne le traitement électronique des données se situe avant et pendant la première partie de la préparation de l'inventaire. Il doit analyser avec soin le problème du traitement des données dès le début de l'opération d'inventaire et on doit en tenir compte dans les études de coût et de temps.

323 Traitements combinés. Dans certains cas (petits inventaires, plans d'exploitation, etc.) on peut combiner les traitements manuels et électroniques. Lorsque les calculs mineurs et d'apurement sont réalisés manuellement, des calculs plus compliqués tels que l'analyse de régression ou les calculs d'erreur d'échantillonnage sont réalisés sur des calculatrices de table préprogrammées (tels que les WANG 700 ou les Olivetti 600) ou sur ordinateurs numériques des centres de calcul. Un premier inconvénient de cette méthode est que l'apurement ne se fait pas automatiquement, mais l'inconvénient majeur est que les données sont manipulées et transcrites plusieurs fois ce qui peut provoquer des erreurs supplémentaires lors du traitement. Les méthodes combinées de traitement diffèrent donc des procédés de traitement complètement intégrés que l'on peut considérer comme des ''systèmes clos'' dans lesquels les données de base ne sont plus retouchées après apurement. Ces méthodes ne sont donc conseillées que si le traitement entièrement électronique est impossible.

33 Aspects pratiques du traitement électronique des données

331 Traitement intégré. D'un point de vue pratique il est important de décider quelles parties du traitement électronique seront réalisées dans le cadre du projet d'inventaire. Comme nous l'avons dit plus haut, l'expert en inventaire lui-même doit, dans tous les cas, préparer le système de traitement. La perforation des données peut se faire dans le cadre du projet, si une perforatrice peut être louée pour le temps nécessaire et si on peut former une secrétaire ou un commis à la perforation-vérification. On peut incorporer la programmation dans le projet si l'expert en inventaire a le temps de la faire et suffisamment d'expérience en la matière ou si d'autres membres du personnel peuvent apprendre à programmer. Puisque la programmation en FORTRAN ou dans un autre langage peut être apprise facilement avec un cours d'informatique de deux ou trois semaines, les chefs d'équipe de terrain peuvent, par exemple, faire cette programmation lorsqu'ils ne travaillent pas sur le terrain. Cette méthode est appliquée avec succès depuis longtemps dans l'inventaire forestier national suédois.

Un projet avec traitement totalement intégré a l'avantage de maintenir en permanence un contact étroit entre le personnel d'inventaire et le personnel chargé du traitement, ce qui est capital lors de la phase de réalisation de l'inventaire (apurement des données de base) et lors des phases ultérieures comme lors des études de prérégression pour l'estimation des volumes. En ce qui concerne la perforation, l'expérience a montré qu'elle peut être réalisée plus économiquement et efficacement en dehors du projet par des organismes spécialisés qui ont à leur disposition un personnel qualifié et une longue expérience, ce qui peut réduire considérablement les erreurs de perforation.

332 Sous-traitance. Ces parties du traitement qui ne sont pas réalisées dans le cadre du projet sont sous-traitées à des centres de calcul bien équipés, à des sociétés spécialisées ou à des départements d'informatique des universités, etc. Quelques types de sous-traitance méritent d'être pris en considération qui sont indiqués ci-après et parmi lesquels on choisira le plus approprié aux besoins particuliers de l'inventaire.

332.1 Sous-traitance de la totalité du traitement

Tout le traitement est réalisé en sous-contrat, y compris la perforation des cartes, l'élaboration du système (en collaboration étroite avec l'expert en inventaire), le traitement des données sur ordinateur conformément au système adopté et la préparation des résultats finals demandés.

Pour réaliser le traitement électronique en sous-traitance, il faut que l'inventaire ait comporté une étude approfondie et une spécification du travail à faire sous-contrat, que l'on peut définir par les points suivants:

I. Les spécifications techniques

a) Définition des procédures de calcul telles que:

- modèles de régression pour les tarifs de cubage ou les fonctions de défilement;
- tests statistiques;
- évaluation de la qualité (calcul des différents types de volumes);
- calcul, aux différents niveaux de l'étude, de l'erreur d'échantillonnage.

b) Spécification des sorties demandées, telles que:

- tableaux des nombres de tiges et volumes par
  - essences
  - groupes d'essences
  - types forestiers
  - unités d'inventaire

  qui contiennent des moyennes par unité de surface et des totaux;
- tabulation des tarifs de cubage utilisés pour l'estimation du volume;
- nuages de points et calcul de la droite de régression;
- histogrammes de la répartition des diamètres pour les essences principales ou les groupes d'essences, les types forestiers, les unités d'exploitation, etc.;
- ventilation des superficies dans la zone inventoriée par classes d'accessibilité, de préférence à l'intérieur des blocs ou d'unités plus petites.

II. Obligations du sous-traitant

- Programmation du travail de traitement des données;
- présentation des résultats provisoires en vue d'une vérification et d'une approbation définitive par le projet;
- documentation sur les programmes de traitement électroniques, y compris les ordinogrammes, les listings de programmes, les jeux de cartes ou les bandes magnétiques correspondant au programme, description détaillée des procédures d'utilisation des programmes (préparation des cartes de contrôle du système, cartes paramètres, etc.);
- constitution de bandes de données corrigées et triées pour le stockage et l'utilisation ultérieure par le projet;
- présentation de rapports mensuels concernant l'état d'avancement des travaux effectués et le travail prévu pour le mois suivant.

III. Ventilation des dépenses en:

- nombre d'heures de travail des spécialistes, coûts unitaires et totaux pour:
  - l'encadrement
  - l'analyste-programmeur pour:
    - programmation/vérification
    - documentation
    - production
  - la perforation/vérification
- temps machine (nombre d'heures et coûts unitaires, description du modèle d'ordinateur, type, séries) pour:
  - vérification
  - production
- divers:
  - location ou achat des bandes
  - dépenses de déplacement du sous-traitant
  - frais d'expédition, etc.

332.2 Sous-traitance d'une partie du traitement

Il est possible de faire traiter en sous-contrat une partie seulement du travail, par exemple:

- perforation et vérification des données faites à l'intérieur du projet, ainsi que l'apurement sur de petits ordinateurs auxquels le projet peut avoir accès; et réalisation, sous contrat, de l'élaboration des données et des résultats finals par des centres de calcul importants;

- ou bien sous-contrat limité à l'utilisation de l'ordinateur et des installations d'un centre de calcul.

Lorsqu'on ne peut intégrer l'ensemble du traitement dans le projet d'inventaire, une sous-traitance partielle est, dans la plupart des cas, la meilleure solution. Les spécifications techniques ou autres, à définir dans le contrat, n'ont pas besoin d'être aussi détaillées. Si le contrat ne porte que sur l'utilisation de l'ordinateur et des installations connexes, il faut définir clairement les points suivants:

- utilisation de l'ordinateur lui-même (prévision des temps de machine et d'opérateurs);

- utilisation d'organes périphériques (perforatrice, trieuse, copieuse et traductrice;

- utilisation du ''hardware'' de l'ordinateur (bandes, disques, fichiers sur tambours, pour des périodes prédéterminées);

- utilisation du ''software'' de l'ordinateur (routines statistiques, etc. - voir paragraphe 233 du chapitre VI);

- conseils sur le système et la programmation par le centre d'informatique concernant les problèmes relatifs au langage ou au contrôle du système.

Dans la plupart des cas, le centre de calcul ne devrait faire payer que l'utilisation de l'ordinateur (en heures machine) et aussi parfois le software (au forfait). Les autres services devraient être gratuits. Ces points devront être bien convenus avant la signature du contrat avec un centre de calcul. Dans quelques cas seulement l'utilisation de l'ordinateur sera complètement gratuite.

333 Quelques remarques sur l'utilisation des programmes standard. A notre connaissance, il n'existe pas encore de systèmes généralisés de traitement électronique des données d'inventaire applicables à différents types d'inventaire ou plans d'échantillonnage et assez souples pour produire différents types de tableaux de résultats. Le système FINSYS, mis au point aux Etats-Unis il y a quelques années (voir Frayer et al. 1968), bien que très souple, ne couvre que quelques plans d'échantillonnage utilisés dans ce pays et nécessite des ordinateurs assez gros (une mémoire centrale d'au moins 32-K). De plus le contrôle du programme à l'aide de cartes paramètres paraît être particulièrement délicat.

C'est pourquoi la FAO travaille actuellement à un système général de traitement pour les inventaires des forêts tropicales. Ses caractéristiques principales sont les suivantes:

- souplesse complète des parties concernant entrées et apurement;
- limitations des phases d'élaboration et de calcul des erreurs aux plans d'échantillonnage les plus courants;
- une certaine souplesse dans la production des sorties (tableaux des résultats), avec possibilité de produire d'autres tableaux que ceux recommandés par la FAO (voir paragraphe 314.1).

Mais il existe un certain nombre d'autres routines préprogrammées, disponibles dans la plupart des centres de calcul, qui sont très utiles et peuvent être incluses dans les systèmes de traitement des inventaires forestiers. On peut faire, à l'aide de programmes standard, les analyses de régression, de variance et de covariance, reproduire des nuages de points et des histogrammes, stratifier et étudier les distributions, à condition que les programmes soient compatibles dans la mesure où ces techniques aident à résoudre les problèmes posés. On peut recommander les collections suivantes de programmes standard:

- BMD (''Biomedical Computer Programmes''), mis au point à l'université de Californie (voir Dixon 1968) à l'origine pour les ordinateurs IBM 7094 mais applicables à d'autres ordinateurs ayant une capacité de mémoire d'au moins 32 K mots.
- Les programmes statistiques du Centre de Calcul allemand (DRZ = Deutsches Rechen-Zentrum - voir DRZ 1969), élaborés pour compléter les séries BMD.

De plus, la plupart des fabricants d'ordinateurs fournissent à leurs centres de calcul des routines statistiques facilement accessibles aux usagers, car ces ''STATPACKS'' sont en général enregistrés sur disques ou tambours.

On utilisera le plus souvent possible les programmes standard pour le traitement d'un inventaire forestier, car cela permet de grandes économies de temps et d'argent.

CHAPITRE VII

CONSIDERATIONS SUR LES DISPOSITIFS D'INVENTAIRE

CHAPITRE VII

CONSIDERATIONS SUR LES DISPOSITIFS D'INVENTAIRE

1 Introduction

Les chapitres précédents traitent des principales techniques utilisées en inventaire forestier - échantillonnage, télédétection, dendrométrie et traitement des données. La préparation et la planification d'un inventaire forestier consistent, principalement, à concevoir la meilleure combinaison de ces diverses techniques permettant d'atteindre les objectifs visés et tenant compte au mieux des conditions humaines et de milieu. On voit donc que même les problèmes de traitement des données doivent être envisagés dès le début car la disponibilité en personnel et en moyens de calcul joue également sur la méthodologie utilisée, comme nous l'avons déjà vu au chapitre VI.

Il serait vain de vouloir étudier toutes les situations, tous les objectifs des opérations d'inventaire des ressources forestières, toutes les combinaisons de techniques susceptibles d'être les meilleures dans tel ou tel cas. Ce serait un travail sans fin et illusoire. On a adopté ici une optique plus modeste et plus réaliste, se bornant à étudier certains problèmes résultant de la combinaison de ces techniques et à faire quelques remarques sur leur application aux conditions réelles de travail.

On a déjà comparé différentes méthodes techniques d'estimation des volumes et d'évaluation qualitative au chapitre V. Leurs effets sur la précision et l'utilité des résultats d'inventaire sont loin d'être négligeables, mais l'essentiel des dépenses est imputable aux travaux de terrain, notamment dans les forêts tropicales mélangées. Les principales questions intéressent donc la phase générale des travaux d'inventaire:

- Dans quelle mesure peut-on combiner l'interprétation des images obtenues par la télédétection avec les travaux sur le terrain afin de réduire ces derniers et de diminuer ainsi le prix de revient de l'inventaire (pour une précision donnée des estimations finales des paramètres sur toute la zone inventoriée)?

- Une fois décidée l'importance relative de la télédétection, quelles sont les caractéristiques du plan d'échantillonnage sur le terrain le mieux adapté.

Les deux sections suivantes du présent chapitre donnent des indications utiles pour résoudre ces problèmes. Des formules correspondant aux dispositifs classiques combinés de photointerprétation et de sondage sur le terrain ainsi que les cas auxquels elles s'appliquent sont exposées dans la Section 2. Le chapitre III donnait des formules générales de plans classiques de sondage sur le terrain. La 3ème section contient quelques indications sur le choix du meilleur plan de sondage sur le terrain particulièrement pour les forêts tropicales mélangées.

La plupart des inventaires forestiers ont pour but d'estimer les caractéristiques des peuplements à un moment donné. Mais il existe des dispositifs d'inventaire permanent qui sont une combinaison de différents échantillons choisis successivement; on les désigne par le terme générique ''d'inventaire forestier continu''; ils sont brièvement traités dans la 4ème partie. Un autre type de dispositif consiste à procéder par étapes, la poursuite d'un sondage dans une étape ultérieure étant décidée en fonction des résultats obtenus aux étapes précédentes. Ces sondages séquentiels sont traités dans le 5ème partie.

2 Combinaisons photointerprétation/sondage sur le terrain

21 Remarques préliminaires

On suppose dans la présente section que les conditions de base mentionnées dans l'introduction du chapitre I sont réalisées: la surface totale de la zone inventoriée est supposée parfaitement connue et cartographiée à une échelle utilisable (qui permet la définition des

bases pour les plans de sondage) et les caractéristiques des peuplements sont estimées par sondage sur le terrain (la mesure photogrammétrique des caractéristiques des peuplements n'est pas traitée parce qu'elle n'est, en général, pas utilisable dans les inventaires de forêts tropicales hétérogènes).

En inventaire forestier, l'interprétation des documents de la télédétection sert surtout à stratifier la zone à inventorier en parties ou strates plus homogènes, qui sont sondées séparément sur le terrain afin d'obtenir des estimations plus précises des valeurs totales des caractéristiques forestières pour toute la zone. Pour les raisons données ci-dessous, il est assez rare que les surfaces des strates soient connues exactement ou presque; pour les estimer, il faut un plan rationnel de sondage.

22 Surfaces des strates connues exactement ou presque

Les surfaces des strates sont dites connues exactement ou presque, lorsque les limites réelles actuelles des strates sont tracées sur une carte planimétrique valable et stable et que leurs surfaces sont calculées avec soin ou estimées avec précision en utilisant une grille de points très fine (voir la 5ème section du chapitre IV). On peut localiser les limites réelles actuelles des strates sur les photographies si les deux conditions suivantes sont réalisées:

- on dispose de photographies aériennes très récentes à une échelle suffisante, ou, dans le cas de photographies moins récentes (jusqu'à trois ans au maximum), on pense qu'il n'y a pas eu de changements significatifs entre la date de la mission aérienne et celle de l'inventaire forestier (significatifs par rapport à la précision rercherchée pour l'estimation des surfaces);

- on ne prévoir pas d'erreur systématique de photointerprétation et par conséquent aucune unité d'échantillonnage ou presque ne devra être transférée d'une strate dans une autre lors de l'inventaire sur le terrain.

Evidemment ces conditions sont rarement réalisées. Même avec une couverture aérienne de l'année, il faut toujours prévoir des incohérences et des erreurs dans la photointerprétation car ce n'est pas un travail purement objectif. On ne peut éviter les erreurs et les contradictions entre deux interprétations successives d'un même interprétateur ou entre deux interprétateurs différents que si la stratification est simple et facile et si les strates ont des limites nettes (et, comme nous l'avons déjà dit au paragraphe 334.1 du chapitre IV, il est en général difficile de délimiter objectivement les strates car il peut y avoir des zones de transition plus ou moins étendues).

Dans les rares cas où l'on peut avoir une évaluation parfaite (ou presque parfaite) de la surface des strates (lorsqu'on suppose qu'il n'y a pas eu de mauvaise photointerprétation), la base du sondage de chaque strate est bien définie et on pourra tirer indépendamment l'échantillon dans chaque strate sur le terrain. On peut obtenir les valeurs moyennes et les variances estimées des caractéristiques de la forêt par unité finale de population, à partir des échantillons sur le terrain en utilisant les formules données au chapitre III pour les plans de sondage avec stratification a priori (formules 5, 6, 11, 12 dans le cas de sondages à un degré), où les tailles totales N_h (ou X_h) des strates et N (ou X) de la population peuvent être remplacées respectivement par les surfaces S_h et S.

On obtient la valeur totale des caractéristiques de la forêt inventoriée en multipliant la valeur moyenne par unité finale par le nombre total (exactement connu) d'unités finales. L'erreur type, en pourcentage, est le même que pour la valeur moyenne.

Il peut arriver que l'on choisisse d'abord un échantillon non stratifié pour toute la zone et que l'on fasse la stratification a posteriori sur la base de critères reconnus sur le terrain et reconnaissables sur photographies. Si l'on admet que cette stratification est valable, on pourra connaître la taille exacte des strates; les moyennes et variances

estimées par strate sont données par les formules (7) et (8) du chapitre III (dans le cas d'un échantillonnage à un degré ayant des unités égales) qui ne sont pas tout à fait les que dans le cas d'une stratification a priori. Les valeurs totales sont obtenues comme dans le cas d'une stratification a priori et les erreurs types estimées sont les mêmes que pour les valeurs moyennes correspondantes.

23 Surfaces des strates estimées par sondage

Dans ce cas, l'estimation des strates par sondage augmente l'erreur d'échantillonnage des estimations des valeurs totales des caractères du peuplement pour toute la zone inventoriée ou pour des strates individuelles.

En inventaire forestier, il y a différentes façons d'estimer les surfaces des strates par sondage. Les principales sont les suivantes:

a) sondage sur photographies (ou sur cartes), on suppose que la photointerprétation n'est pas biaisée (c'est le même cas que dans le paragraphe précédent, en remplaçant la planimétrie par le sondage);

b) sondage sur le terrain à partir du même échantillon (ou d'un échantillon plus important) utilisé pour l'estimation des caractères du peuplement: on suppose que les estimations des surfaces ne sont pas biaisées et n'ont donc pas à être corrigées puisque dans cette méthode les strates sont identifiées sur place;

c) sondage à partir des photographies (ou même par planimétrie sur cartes), on corrige ensuite les estimations de surface par un sondage sur le terrain, en utilisant le même échantillon que pour estimer les caractéristiques du peuplement (ou un échantillon plus important).

Lorsqu'on estime les surfaces par sondage il est important de distinguer le cas où les unités d'échantillonnage sont des points ou des parcelles (le paramètre correspondant prenant les valeurs 1 ou 0 suivant que le point ou la parcelle appartient, ou non, à la strate considérée), du cas où les unités sont des lignes ou des bandes (le paramètre correspondant étant une longueur ou un rapport de longueurs qui sont tous deux des variables continues).

231 Estimation des surfaces à partir d'un seul échantillon 1/. On peut stratifier et estimer les surfaces des strates par un sondage sur photographies, ou sur le terrain si les photographies ne sont pas utilisables (trop vieilles ou pas assez bonnes pour une stratification utile). L'échantillon utilisé pour estimer les surfaces des strates peut être le même que pour les caractères du peuplement ou il peut être plus important et comprendre alors les unités d'échantillonnage utilisées pour l'estimation des caractères du peuplement).

231.1 Estimation des surfaces en prenant des placeaux comme unités d'échantillonnage

Dans ce cas, le paramètre correspondant peut prendre les valeurs 1 ou 0 suivant que le placeau appartient ou non à la strate considérée. On obtient la surface de la strate en multipliant la surface totale de la zone inventoriée (qui est supposée parfaitement connue) par la proportion (estimée) de placeaux appartenant à cette strate.

231.11 Estimation des surfaces et des caractéristiques du peuplement à partir du même échantillon

Si l'estimaiton est faite par photointerprétation, les unités d'échantillonnage utilisées pour l'estimation des caractéristiques du peuplement sur le terrain sont centrées sur les placeaux interprétés sur photographies (voir paragraphe 334.2 du chapitre IV).

1/ Par échantillon on entend l'ensemble des unités tirées en suivant un plan d'échantillonnage donné.

Il peut s'agir de placeaux simples ou en grappes, dont chacun peut être plus ou moins grand que les placeaux photographiques mais à condition que chacun appartienne en entier à la strate du placeau correspondant sur photographies (on suppose qu'il n'y a pas de correction à apporter à la photointerprétation).

Si les placeaux sont répartis aléatoirement, on estime les proportions P_h et les variances des strates à l'aide des formules (3) et (4) du chapitre III s'il s'agit d'un sondage à un degré, ou à l'aide des formules (13') et (14') du même chapitre si on a utilisé un dispositif à deux degrés dans lequel les surfaces utiles des photographies (supposées égales) sont les unités primaires, tirées au hasard, et le même nombre de placeaux (unités secondaires) est tiré sur chaque photographie. Comme nous l'avons dit au paragraphe 532 du chapitre IV, on peut envisager d'autres plans de sondage. Le pourcentage d'erreur type de l'estimation des surfaces des strates est le même que pour les proportions correspondantes car on suppose la surface totale connue.

Si les parcelles sont distribuées systématiquement dans un sondage à un degré, il est conseillé d'utiliser pour estimer les variances les formules du paragraphe 531 du chapitre IV, dans lesquelles la constante k a une valeur correspondant à la forme de la strate considérée.

On estime les moyennes et les variances des caractères du peuplement par unité finale d'échantillonnage à l'aide des formules du plan de sondage non stratifié correspondant. Les estimations correspondantes des totaux de toute la population sont obtenues en multipliant les moyennes estimées par le nombre total de placeaux dans la zone inventoriée (ou par sa surface totale si ce sont des moyennes par unité de surface). L'erreur type (pourcentage) est alors la même que pour les moyennes correspondantes.

Les estimations des moyennes par unité finale de chaque strate et leurs variances sont obtenues à partir des valeurs de toutes les unités d'échantillonnage appartenant aux strates correspondantes. Il faut cependant faire attention car on realise l'échantillonnage sur la population totale et les formules qu'on lui applique ne sont pas nécessairement utilisables au niveau de la strate. On obtient les estimations des totaux par strate en multipliant la moyenne correspondante par la surface estimée de la strate considérée.

Si $\bar{y}_h$ est la moyenne estimée par unité de surface d'une caractéristique, y du peuplement dans la strate h,

$\hat{P}_h$ est la proportion estimée de la strate h,

S est la surface totale de la zone inventoriée,

une estimation $\hat{Y}_h$ de la valeur totale de cette caractéristique dans la strate est alors: $\hat{Y}_h = S\hat{P}_h\bar{y}_h$ et une estimation de sa variance est:

$$v(\hat{Y}_h) = S^2 \left[\hat{P}_h^2 \, v(\bar{y}_h) + \bar{y}_h^2 \, v(\hat{P}_h) \right]$$

où $v(\bar{y}_h)$ et $v(\hat{P}_h)$ sont respectivement les variances estimées de $\bar{y}_h$ et $\hat{P}_h$. Cette formule est acceptable si $v(\bar{y}_h)$ et $v(\hat{P}_h)$ sont petits par rapport à $\bar{y}_h^2$ et $\hat{P}_h^2$ respectivement.

Rappelons que ces dispositifs diffèrent considérablement des sondages avec stratification a posteriori. Dans ce dernier cas, on suppose que la taille des strates est connue exactement ou presque, ce qui n'est pas le cas des dispositifs étudiés dans le présent paragraphe, dans lesquels on n'a qu'une estimation de la taille des strates.

Dans les paragraphes précédents, comme dans toute la section 23, nous n'envisageons pas la correction ou la pondération des valeurs obtenues par photointerpretation pour les placeaux qui peut être nécessaire pour tenir compte des variations d'échelle et de recouvrement de la couverture aérienne, (voir paragraphe 334.2 du chapitre IV). Cette correction apparaît sous la forme de coefficients dans les formules d'estimation des moyennes et des totaux et complique un peu l'estimation des variances correspondantes. Afin d'éviter cette complication, on conseille de placer l'échantillon à utiliser pour l'estimation des surfaces par photointerprétation sur une carte existante ou sur la mosaïque non contrôlée correspondante (à condition que cette dernière puisse être assimilée approximativement à une carte. Si l'on préfère faire la correction, le lecteur consultera utilement les exemples donnés au paragraphe 25.32 de Forest Inventory (volume 1, page 235-244) par F. Loetsch et K. Haller.

231.12 Estimation des surfaces à partir d'un échantillon plus important que celui utilisé sur le terrain pour l'estimation des caractéristiques du peuplement

L'échantillon utilisé sur le terrain pour estimer les caractéristiques du peuplement est un sous-échantillon de l'échantillon utilisé en photointerprétation ou sur le terrain pour estimer les surfaces des strates. Si on estime les superficies par photointerprétation, on centre les unités de sondage du sous-échantillon du terrain sur une partie des placeaux interprétés sur les photographies et on admet qu'elles appartiennent entièrement à la strate du placeau correspondant. On supposera que l'échantillon primaire et le sous-échantillon sont tous les deux obtenus par tirage aléatoire à un degré. Ce type d'échantillonnage combiné s'appelle un échantillonnage à deux phases ou double échantillonage.

On estime les superficies à partir du grand échantillon de parcelles, en utilisant la méthode décrite au paragraphe précédent.

Si $\hat{S}_h$, $\hat{P}_h$ et S sont respectivement la superficie estimée de la strate h (L strates au total), la proportion estimée de l'échantillon et la superficie totale (parfaitement connue) de la zone inventoriée, on a alors:

$$\hat{S}_h = \hat{P}_h . S \quad (\sum_{h=1}^{L} \hat{P}_h = 1) \tag{1}$$

Les moyennes estimées $\bar{y}_{st}$ des caractéristiques du peuplement par unité d'échantillonnage de la zone inventoriée sont:

$$\bar{y}_{st} = \sum_{h=1}^{L} \hat{P}_h \bar{y}_h \tag{2}$$

où les $\bar{y}_h$ sont les moyennes estimées par unité d'échantillonnage des caractéristiques du peuplement dans chaque strate. Ces moyennes sont obtenues à partir du sous-échantillon du terrain et la sommation s'étend à toutes les strates.

Le calcul des variances des estimations $\bar{y}_{st}$ dépend de la façon dont le sous-échantillon a été choisi à l'intérieur de l'échantillon.

a) Si le nombre d'unités d'échantillonnage par strate du sous-échantillon n_h ne dépend pas de la proporition estimée $\hat{P}_h$ de la strate correspondante, une estimation de la variance de $\bar{y}_{st}$ est alors:

$$v(\bar{y}_{st}) = \sum_{h=1}^{L} \left[(\hat{P}_h^2 - \frac{\hat{P}_h}{n'}) \frac{s_h^2}{n_h} + \frac{\hat{P}_h (\bar{y}_h - \bar{y}_{st})^2}{n'} \right] \tag{3}$$

que l'on peut aussi écrire:

$$v(\bar{y}_{st}) = \sum_{h=1}^{L} (\hat{P}_h^2 - \frac{\hat{P}_h}{n'}) \frac{s_h^2}{n_h} + \frac{1}{n'} \left[\sum_h \hat{P}_h \bar{y}_h^2 - (\sum_h \hat{P}_h \bar{y}_h)^2 \right] \tag{3'}$$

où: n' est le nombre d'unités d'échantillonnage dans le grand échantillon

s_h^2 est la variance estimée de la caractéristique y du peuplement dans la strate h:

$$s_h^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n_h}(y_{hi} - \bar{y}_h)^2}{n_h - 1}$$

(i est l'indice d'une unité d'échantillonnage dans la strate h du sous-échantillon du terrain).

b) Si n_h dépend de $\hat{p}_h$, la formule qui donne la variance estimée de $\bar{y}_{st}$ est alors un peu différente. Dans le cas d'une répartition proportionnelle des unités d'échantillonnage dans le sous-échantillon du terrain, par exemple si $n_h = n\hat{p}_h$ où $n \sum_{h=1}^{L} n_h$ est la taille du sous-échantillon, une estimation de la variance est alors:

$$v(\bar{y}_{st}) = \sum_{h=1}^{L} \hat{p}_h \cdot \frac{s_h^2}{n_h} + \frac{1}{n} \cdot \left[\sum_{h=1}^{L} \hat{p}_h \bar{y}_h^2 - \left(\sum_h \hat{p}_h \bar{y}_h \right)^2 \right] \qquad (4)$$

Les formules (2), (3), (3') et (4) sont dites de double échantillonnage avec stratification. On obtient les totaux pour la zone inventoriée en multipliant les moyennes estimées par la surface totale connue. Les erreurs types (en pourcentage) sont les mêmes que pour les moyennes correspondantes. Les estimations des totaux par strate sont alors:

$$\hat{Y}_h = \hat{S}_h \cdot \bar{y}_h = (\hat{P}_h \cdot S)\bar{y}_h \qquad (5)$$

231.2 Estimation des surfaces quand les unités d'échantillonnage sont des lignes parallèles

On considère alors la ligne comme étant l'unité d'échantillonnage et pour une strate donnée le paramètre est une variable continue car la longueur d'une partie de ligne dont on a constaté (sur photographies, sur cartes ou sur le terrain) qu'elle appartient à une strate peut, en principe, prendre toutes les valeurs entre 0 et la longueur totale de la ligne. Ce cas s'applique aussi aux bandes, aux ligne de placeaux (l'affectation aux strates dans ce cas étant limitée aux placeaux eux-mêmes) et même aux grappes de placeaux, à condition que le nombre de placeaux par ligne, ou par grappe soit assez important.

Nous nous bornerons aux cas où le même échantillon est utilisé pour estimer les superficies des strates et les caractéristiques du peuplement.

Si toutes les lignes dans la zone inventoriée ont la même longueur totale l (par exemple, si la zone inventoriée est carrée ou rectangulaire et si les lignes sont parallèles à un côté de la surface), on peut alors estimer la superficie des strates (dans un sondage à un degré) par la formule suivante:

$$\hat{S}_h = S \cdot \frac{\sum_i l_{hi}}{nl} = \frac{S}{l} \cdot I_h \qquad (6)$$

où S est la surface totale de la zone inventoriée

I_h est la longueur moyenne estimée d'une ligne dans la strate h (unité d'échantillonnage) pour la strate h: $I_h = \frac{\sum_i l_{hi}}{n}$ (i étant l'indice d'une ligne)

Si les lignes parallèles sont distribuées aléatoirement, on peut utiliser la formule (2) du chapitre III pour estimer la variance de $\bar{I}_h$, l'erreur type en pourcentage de $\hat{S}_h$ étant égal à celui de $\bar{I}_h$. Si ces lignes sont réparties systématiquement il faudra adapter les formules données dans la section 423 du chapitre III.

Dans la plupart des cas les lignes ont des longueurs totales inégales. L'estimation par le quotient est donc nécessaire. Dans le cas d'un sondage aléatoire à un degré avec n lignes parallèles où l_i et l_{ih} sont respectivement la longueur totale de la ligne i et la longueur de(s) la portion(s) de ligne i appartenant à la strate h, une estimation de la surface de la strate h sera alors donnée par la formule suivante:

$$\hat{S}_h = S \frac{\sum_{i=1}^{n} l_{ih}}{\sum_{i=1}^{n} l_i} = S \frac{\bar{I}_h}{\bar{I}} \qquad (7)$$

$\bar{I}_h$ et $\bar{I}$ étant respectivement les moyennes par ligne des longueurs appartenant à la strate h et des longueurs totales.

On peut estimer l'erreur type de $\hat{S}_h$ à l'aide des formules (10) où (10') du chapitre III qui se rapportent à la variance de l'estimation d'un quotient.

Les estimations des moyennes par unité de surface des caractéristiques du peuplement dans la population sont des estimations par le quotient lorsque les lignes ont des longueurs totales différentes, ces longueurs étant prises comme paramètres auxiliaires. On peut aussi estimer les moyennes pour chaque strate et ce seront les estimations par le quotient. Comme nous l'avons déjà signalé au paragraphe 231.11, le dispositif d'échantillonnage devra cependant être considéré comme non stratifié car la taille exacte de chaque strate est inconnue. Les remarques faites dans le paragraphe cité ci-dessus, au sujet de l'estimation des moyennes et des totaux par strate, sont aussi valables dans ce cas.

On peut étendre le cas de lignes continues à celui de bandes continues, de lignes de parcelles et de grappes.

232 Estimation des surfaces avec correction sur le terrain. Dans la plupart des cas, des erreurs et des biais inévitables sont commis dans les travaux de photo-interprétation. Ces erreurs sont dues aux interprétateurs, à la stratification trop fine, à l'imperfection des photographies et, le plus souvent, aux modifications de la végétation intervenues entre la couverture aérienne et l'inventaire sur le terrain. Il faudra donc corriger les estimations des surfaces faites par photointerprétation par des observations sur le terrain dans un sous-échantillon de l'échantillon utilisé pour la photointerprétation.

Nous nous bornerons au dispositif décrit ci-dessous, qui est très utilisé dans l'inventaire forestier des zones tempérées, mais demande une bonne adaptation pour être utilisable dans les forêts tropicales hétérogènes. Il comprend les étapes suivantes:

a) choix d'un échantillon non stratifié de placeaux à interpréter sur photographie ou échantillon pour évaluer la surface des strates h identifiées par photointerprétation (par exemple à l'aide d'une grille systématique placée sur la surface utile de chaque photographie, ou placée sur une mosaïque des ces photographies ou à l'aide d'un tirage aléatoire de points sur une carte que l'on transpose ensuite sur les photographies correspondantes, etc.);

b) tirage (à un degré) d'un sous-échantillon de placeaux parmi les placeaux interprétés. Le nombre de ces placeaux parmi ceux interprétés sur photographie en strate h sera dépendant ou indépendant de la proportion de cette strate (cette proportion étant calculée par photo-interprétation);

c) identification sur le terrain de la strate réelle k à laquelle appartiennent les placeaux du sous-échantillon et mesures pour l'estimation des caractéristiques y du peuplement dans ces placeaux.

Si $\hat{P}_h$ est la proportion de placeaux de l'échantillon primaire que l'on a affectée par photointerprétation à la strate h

$\hat{P}_{hk}$ est la proportion de placeaux du sous-échantillon que l'on a affectée à la strate h par photointerprétation et à la strate k sur le terrain (lorsque $k \neq h$, il y a erreur d'interprétation)

une estimation $\hat{p}_k$ de la proportion réelle de la strate k dans la zone inventoriée est donnée par la formule:

$$\hat{p}_k = \sum_{h=1}^{L} \hat{P}_h \cdot \hat{p}_{hk} \qquad (8)$$

Une estimation $\bar{y}_{st}$ de la valeur moyenne par unité (ou par unité de surface) sur toute la zone inventoriée de la caractéristique y du peuplement est donc:

$$\bar{y}_{st} = \sum_{k=1}^{L} \sum_{h=1}^{L} \hat{P}_h \cdot \hat{p}_{hk} \bar{y}_{hk} \qquad (9)$$

où $\bar{y}_{hk}$ est l'estimation de la valeur moyenne par unité d'échantillonnage (ou par unité de surface) de la caractéristique y du peuplement pour la portion appartenant effectivement à la strate k mais affectée par photointerprétation à la strate h.

L'estimation de la valeur moyenne de y par unité (ou par unité de surface) dans la strate k est alors:

$$\bar{y}_k = \frac{\sum_{h=1}^{L} \hat{P}_h \cdot \hat{p}_{hk} \bar{y}_{hk}}{\sum_{h=1}^{L} \hat{P}_h \cdot \hat{p}_{hk}} \qquad (10)$$

Les totaux estimés pour toute la zone inventoriée $\hat{Y}$ et pour la strate k, $\hat{Y}_k$ sont obtenus en multipliant les formules (9) et (10) respectivement par S et $S(\sum_{h=1}^{L} \hat{P}_h \cdot \hat{p}_{hk})$, (S étant la surface de la zone inventoriée), $\bar{y}_{hk}$, dans les formules (9) et (10), étant la valeur moyenne par unité de surface.

On a une estimation de la variance $\hat{p}_k$ en appliquant la formule de double échantillonnage avec stratification à la variable (1,0) qui indique si un placeau interprété en strate h sur la photographie appartient ou non à la strate k. La transformation de la formule (3') nous donne (dans le cas où les n_k sont indépendants des $\hat{P}_h$):

$$v(\hat{p}_k) = \sum_{h=1}^{L} \left(\hat{P}_h^2 - \frac{\hat{P}_h}{n'}\right) \frac{\hat{p}_{hk}(1-\hat{p}_{hk})}{n_h} + \frac{1}{n'} \left[\sum_{h=1}^{L} \hat{P}_h \hat{p}_{hk}^2 - \left(\sum_{h} \hat{P}_h \hat{p}_{hk}\right)^2\right] \qquad (11)$$

n' et n_h sont comme dans la formule (3) la taille de l'échantillon primaire de la photointerprétation et le nombre d'unité du sous-échantillon pris dans la strate h.

Dans la plupart des cas on peut négliger le terme $\frac{\hat{P}_h}{n'}$.

Si on répartit proportionnellement le sous-échantillon dans les strates h de photo-interprétation (à savoir si $n_h = n\hat{P}_h$, avec $n = \sum_h n_h$), la formule (11) devient alors

$$v(\hat{P}_k) = \sum_{h=1}^{L} \hat{P}_h \frac{\hat{P}_{hk}(1 - \hat{P}_{hk})}{n_h} + \frac{1}{n} \left[\sum_{h=1}^{L} \hat{P}_h \hat{P}_{hk}^2 - \left(\sum_h \hat{P}_h \hat{P}_{hk} \right)^2 \right] \qquad (12)$$

Bien que les estimations des variances des moyennes et des totaux des caractéristiques du peuplement par strate et pour toute la forêt inventoriée soient assez compliquées, un tel dispositif est utile car il permet de réduire l'erreur grâce à la photointerprétation, même lorsque les photographies ne sont pas toutes très récentes, ce qui est souvent le cas. (Il faudra demander l'aide d'un statisticien pour déterminer une estimation des variances des moyennes et des totaux pour les caractéristiques du peuplement). On notera cependant que s'il y a beaucoup de contradictions entre la photointerprétation et les vérifications sur le terrain et si la taille du sous-échantillon est relativement petite, les surfaces des strates seront estimées avec une très faible précision.

24 Autres utilisations des dispositifs d'échantillonnage à deux phases

Les dispositifs de double échantillonnage donnés ci-dessus sont utilisés pour rendre plus précises les estimations des caractéristiques du peuplement en améliorant l'estimation de la surface des strates. Ce sont des méthodes de double échantillonnage pour la stratification.

On peut cependant utiliser d'autres dispositifs de double échantillonnage, par exemple avec estimation par régression: c'est le cas lorsque l'on mesure les caractéristiques du peuplement par photogrammétrie (par exemple le volume brut de toutes les essences) sur un grand échantillon de placeaux et qu'on corrige en suite ces mesures par régression sur un sous-échantillon pris sur le terrain. En supposant que chaque échantillon est obtenu par tirage aléatoire non stratifié, on estime la moyenne corrigée $\bar{y}_{Re}$ par unité d'échantillonnage par la formule suivante:

$$\bar{y}_{Re} = \bar{y} + b\,(\bar{x}' - \bar{x}) \qquad (13)$$

où: $\bar{y}$ est l'estimation de la moyenne du caractère y par unité d'échantillonnage obtenue à partir du sous-échantillon de terrain:

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^{n} y_i}{n}$$

$\bar{x}$ est l'estimation de la moyenne par unité d'échantillonnage des mesures photogrammétriques de ce même caractère sur les parcelles du sous-échantillon de terrain

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i}{n}$$

$\bar{x}'$ est l'estimation de la moyenne par unité d'échantillonnage des mesures photogrammétriques de ce même caractère sur tous les placeaux du grand échantillon de photo-interprétation

$$\bar{x}' = \frac{\sum_{i=1}^{n'} x_i}{n'}$$

et on estime b par

$$b = \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})(y_i-\bar{y})}{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2}$$

où x_i et y_i sont les valeurs de x (mesure photogrammétrique) et de y (caractéristique mesurée sur le terrain) dans le placeau i du sous-échantillon de terrain.

Lorsque la taille n de sous-échantillon n'est pas trop petite, une estimation de la variance de $\bar{y}_{Re}$ est alors:

$$v(\bar{y}_{Re}) = \frac{s^2_{y.x}}{n} + \frac{s^2_y - s^2_{y.x}}{n'} \qquad (14)$$

où: n' est la taille du grand échantillon

$$s^2_y = \frac{\sum_{i=1}^{n}(y_i-\bar{y})^2}{n-1}$$

et

$$s^2_{y.x} = \frac{1}{n-2}\left[\sum_{i=1}^{n}(y_i-\bar{y})^2 - b^2\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2\right]$$

On peut imaginer un échantillonnage double avec régression pour le caractère y du peuplement avec toute autre variable auxiliaire x estimée à partir d'un échantillon plus important sur photographie ou sur le terrain et qui est en corrélation linéaire avec y.

L'échantillonnage double avec régression est aussi utile pour les estimations des surfaces des strates obtenues par des vols de reconnaissance le long de lignes parallèles, utilisés, par exemple, pour corriger les estimations obtenues par photointerprétation. Ces méthodes doivent cependant être utilisées avec précaution car il est en général difficile de localiser avec précision un point survolé sur une carte du fait de la vitesse et de l'orientation irrégulières de l'avion.

Lorsque la droite qui représente la relation entre y et le paramètre auxiliaire x passe par l'origine - à savoir lorsque y tend vers zéro avec x - on utilise l'échantillonnage double avec estimaiton par le quotient. L'estimation par le quotient $\bar{y}_R$ sera alors:

$$\bar{y}_R = \frac{\bar{y}}{\bar{x}}\,\bar{x}' = \hat{R}\bar{x}' \qquad (15)$$

où $\bar{y}$ est l'estimation de la moyenne du caractère y par unité d'échantillonnage, obtenue à partir du sous-échantillon

$\bar{x}$ est l'estimation de la moyenne du paramètre auxiliaire par unité d'échantillonnage, obtenue à partir du sous-échantillon

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^{n}x_i}{n} \qquad \bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^{n}y_i}{n}$$

$\bar{x}'$ est l'estimation de la moyenne du paramètre auxiliaire par unité d'échantillonnage obtenue à partir du grand échantillon

$$\bar{x}' = \frac{\sum_{j=1}^{n'} x_j}{n'}$$

Une estimation de la variance de $\bar{y}_R$ - le plus petit échantillon (de taille n) étant un sous-échantillon du plus grand (de taille n') - est alors donnée par:

$$v(\bar{y}_R) = \frac{s_y^2 - 2\hat{R}\, s_{xy} + \hat{R}^2 s_x^2}{n} + \frac{2\hat{R}\, s_{xy} - \hat{R}^2 s_x^2}{n'} \qquad (16)$$

où n, n', $\hat{R}$ et s_y^2 ont la même signification que plus haut et où:

$$s_x^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}{n-1}$$

$$s_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{n-1} \quad \text{(estimation de la covariance de x et y)}$$

Un exemple de double échantillonnage avec estimation par le quotient est celui où on estime rapidement le volume du bois sur un échantillon de terrain (cette estimation étant le paramètre auxiliaire x) et où on évalue, avec plus de précision, le volume y à partir de mesures détaillées des arbres dans un sous-échantillon.

Les dispositifs de double échantillonnage sont des outils puissants dans un inventaire forestier soit pour la stratification soit quand on fait intervenir un paramètre auxiliaire (estimation par régression ou par le quotient), mais l'estimation des variances des résultats y est souvent difficile et compliquée. Lorsqu'on a un double échantillonnage avec estimation par le quotient ou par régression, la relation entre le paramètre à estimer et le paramètre auxiliaire doit être établie et le dispositif doit être conçu de façon à réduire les biais inévitables des estimations. L'aide d'un statisticien est particulièrement utile dans ce cas.

3 Considérations sur les dispositifs de sondage sur le terrain

La section précédente traite de quelques aspects de la combinaison des renseignements recueillis par télédétection et sur le terrain. Il est d'ailleurs très important dans un inventaire forestier de réduire autant que possible les travaux de terrain en utilisant au maximum l'interprétation des documents de la télédétection, pour économiser le personnel, le matériel et l'argent. Mais dans la plupart des inventaires forestiers le travail de terrain est inévitable, notamment lorsqu'il faut estimer avec précision des caractéristiques du peuplement tels que les volumes bruts et exploitables. Même dans le cas de sondages de peuplements homogènes à l'aide de photographies aériennes à grande échelle et de tarifs de cubage photographiques, les vérifications sur place sont indispensables pour corriger par double échantillonnage les estimations obtenues à partir des photographies. Dans les forêts tropicales hétérogènes, la partie la plus importante et la plus coûteuse des opérations d'inventaire forestier est, en général, le sondage au sol, car la possibilité d'interpréter des photographies aériennes y est limitée. Comme nous l'avons vu au chapitre IV la première contrainte dans l'utilisation des photographies aériennes pour l'estimation des caractéristiques du peuplement en forêt tropicale hétérogène est la difficulté que l'on a à identifier les différentes essences. Cependant, même si l'on pouvait les identifier convenablement, il resterait d'autres difficultés pour estimer les caractères du peuplement

par télédétection (comme la faible corrélation entre les caractéristiques des couronnes et les dimensions des fûts dans ces forêts naturelles). De plus, on n'a aucun moyen d'évaluer par télédétection, des caractéristiques telles que la régénération, la qualité, la fréquence des pourritures, ou l'accessibilité (portance du sol, les inégalités du terrain).

Le choix de la méthode de sondage au sol est donc capital, On donne, ci-dessous, quelques indications sur la valeur et les avantages relatifs des divers types de distribution de l'échantillon (plans d'échantillonnage au sens strict) et sur la nature, la taille et la forme possibles des unités d'échantillonnage. On considérera séparément ces deux points bien qu'ils soient en fait étroitement liés: ainsi le choix d'un plan d'échantillonnage à un ou deux degrés dépend en partie de la taille des unités d'échantillonnage; si ces dernières sont assez grandes, le modèle d'échantillonnage à deux degrés peut ne pas améliorer significativement l'efficacité, même pour une grande forêt.

31 Distribution de l'échantillon

311 Echantillonnage avec ou sans stratification. Comme l'a dit Cochran dans son livre ''Sampling Techniques'' (2ème édition, page 99), un échantillonnage avec stratification, si il est utilisé intelligemment, aboutit presque toujours à une variance plus faible de la moyenne ou du total estimé qu'un échantillon aléatoire simple comparable. La stratification en inventaire forestier est, en général, réalisée par interprétation des documents de la télédétection avant le sondage au sol (ou après si on évalue les critères de stratification d'après celui-ci). On doit encore souligner qu'il n'y a effectivement stratification que si la taille des strates peut être connue parfaitement (ou presque) ou si, comme dans le cas du double échantillonnage, leur taille s'estime à partir d'un échantillon plus grand. Les formules donnant les variances estimées à partir d'échantillons stratifiés (telles que les formules (6) ou (8) du chapitre III) ne sont donc pas applicables lorsque les limites des ''strates'' sont tracées autour d'une série d'unités d'échantillonnage et lorsqu'il n'y a aucune interprétation ultérieure qui puisse vérifier que toutes les unités de ces ''strates'' correspondent aux critères de stratification définis (par exemple, pente supérieure à 50%, hauteur des arbres dominants dépassant 15 mètres, etc.).

Il faut définir les critères de stratification d'une façon claire et compréhensible. Une stratification très fine obtenue par photointerprétation est en général illusoire car le gain de précision par rapport à une classification plus simple risque d'être plus qu'annulé par des biais subjectifs, des erreurs d'interprétation et des contradictions entre interprétateurs ou entre interprétations successives. Il y a un risque d'erreur d'interprétation même dans le cas d'une classification simple et claire, lorsque les documents de la télédétection sont mauvais ou périmés. Il est donc nécessaire de corriger les surfaces des strates par un échantillonnage tel que celui décrit au paragraphe 232 ci-dessus: la précision des moyennes estimées des caractères du peuplement de toute la zone inventoriée diminue à mesure que la proportion d'erreurs d'interprétation augmente et l'apport de la stratification peut devenir insignifiant par rapport à son prix de revient total. On doit aussi remarquer que lorsqu'il faut corriger la stratification par échantillonnage on ne pourra évaluer parfaitement la localisation exacte des strates, car l'estimation de leurs surfaces réelles devient moins précise à mesure que l'intensité du sondage au sol diminue.

312 Echantillonnage aléatoire ou systématique. Dans le cas de dispositifs d'échantillonnage à un degré, il ne fait aucun doute que les avantages pratiques de la distribution systématique des unités d'échantillonnage dépassent largement l'inconvénient théorique majeur, à savoir la difficulté d'estimer la variance des résultats. La plupart des avantages pratiques qu'offre l'échantillonnage systématique en forêt tempérée sont encore plus apparents en forêt tropicale hétérogène où les conditions du milieu gênent les travaux au sol. Parmi ces avantages, on peut noter la diminution du coût d'accès par unité de surface de l'échantillon, la plus grande objectivité dans le choix de l'échantillon (la distribution systématique de l'échantillon donne moins de latitude aux équipes de terrain de modifier les emplacements des unités d'échantillonnage) et la distribution plus uniforme de l'échantillon (et donc des renseignements) sur la zone inventoriée (ce dernier avantage étant plus significatif

dans des zones inventoriées pour la première fois). On travaille actuellement sur l'estimation des erreurs statistiques dans les échantillonnages systématiques et des méthodes fondées sur la théorie des processus stochastiques pourraient être bientôt disponibles dans la pratique. C'est pourquoi il est vivement recommandé d'adopter une distribution systématique des unités d'échantillonnage chaque fois qu'un échantillonnage à un degré est possible

Dans un dispositif d'échantillonnage à plusieurs degrés, il faut décider à chaque stade de l'échantillonnage s'il convient de faire un tirage systématique ou aléatoire. Les avantages d'une distribution systématique n'ont pas la même importance pour les différents degrés. La distribution régulière des informations à l'intérieur des avant-dernières unités (unités primaires d'un sondage à deux degrés) n'est pas essentielle alors que la répartition systématique des unités d'échantillonnage des premiers degrés peut être particulièrement utile. Par exemple, dans un dispositif d'échantillonnage à deux degrés, pour lequel les unités primaires sont des carrés de 2 kilomètres de côté et les unités secondaires des bandes de 2 kilomètres de long et de 10 mètres de large par exemple, la répartition aléatoire des bandes dans chaque unité primaire n'augmente pas significativement les coûts d'accès mais, par contre, la distribution systématique des carrés sur toute la zone inventoriée peut être très avantageuse, surtout si la zone est inventoriée pour la première fois.

313 Echantillonnage à un ou à plusieurs degrés. L'avantage principal d'un sondage à plusieurs degrés pour une même intensité de sondage et des unités d'échantillonnage (finales) de même taille et de même forme, est que la composante du coût imputable à l'accès aux unités d'échantillonnage (finales) est très réduite. Cela est particulièrement vrai dans les forêts tropicales hétérogènes où la pénétration est difficile. Par contre, la concentration de l'échantillon qui résulte d'un plan à plusieurs degrés augmente la variance des estimations, et plus la variabilité entre les unités du premier degré est importante, plus cette augmentation de la variance est importante.

On peut illustrer ces remarques d'une façon très simple et schématique dans le cas de sondages à deux degrés (voir Desabie - 1966):

a) on peut souvent exprimer la variance de l'estimation sous la forme:

$$v = \frac{A}{n} + \frac{B}{n\bar{m}}$$

où: n est le nombre d'unités primaires

$\bar{m}$ est le nombre moyen d'unités secondaires par unité primaire

A est la mesure de la variabilité entre les unités primaires

B est la mesure de la variabilité moyenne entre les unités secondaires dans une unité primaire donnée.

b) on peut souvent exprimer approximativement le coût du sondage par la relation:

$$C = nC_1 + n\bar{m}C_2$$

où: C_1 est le coût d'accès et de reconnaissance d'une unité primaire

C_2 est le coût d'accès à une unité secondaire (lorsque l'unité primaire est atteinte) et le coût du relevé des données d'inventaire pour cette unité.

On peut comprendre, d'après ces deux formules, que v dépend beaucoup de A et de n et qu'elle aura tendance à être supérieure à la variance correspondant à un dispositif à un degré ayant $n\bar{m}$ unités d'échantillonnage. La deuxième formule explique d'autre part pourquoi C sera inférieur au coût d'accès et d'enregistrement de $n\bar{m}$ unités secondaires distribuées dans un dispositif à un degré.

Si on dispose d'estimations acceptables de A, B, C_1 et C_2 on peut, sous certaines conditions, optimiser le modèle à deux degrés à l'aide du procédé indiqué au paragraphe 341 du chapitre III.

Il ne faut pas oublier cette formulation simple lors du choix entre un modèle à un ou à deux degrés. Comme nous l'avons vu, la taille des unités finales d'échantillonnage est importante et certains modèles d'échantillonnage en grappe à un degré n'ont pas un prix de revient très différent bien qu'ils diffèrent fondamentalement en ce qui concerne l'estimation de la variance. Plus la zone à inventorier est grande et inaccessible, plus le sondage à plusieurs degrés est avantageux; mais il y a d'autres facteurs importants, tels que la nécessité d'une distribution uniforme des informations sur toute la zone inventoriée et la taille des unités d'inventaire pour laquelle il faut donner des estimations.

314 Echantillonnage avec probabilités égales ou inégales. La plupart des dispositifs d'échantillonnage sur le terrain utilisés en inventaire forestier sont constitués d'unités d'échantillonnage tirées avec équiprobabilité (et sans remise). Il existe cependant quelques dispositifs efficaces dans lesquels la probabilité de tirage des unités d'échantillonnage est proportionnelle à la taille, comme celui du paragraphe 422.122 du chapitre III. Lorsqu'on choisit un tel dispositif, il ne faut pas oublier que les tailles de toutes les unités de la population considérée (population des unités primaires dans l'exemple ci-dessus) doivent être connues et mises en liste: dans certains cas, le coût du travail correspondant peut être excessif par rapport au gain de précision escompté.

315 Utilisation d'un paramètre auxiliaire. Il est recommandé d'utiliser, chaque fois que cela est possible, un paramètre auxiliaire en corrélation linéaire avec les paramètres à estimer par le sondage au sol qui peut être déterminé exactement ou estimé à peu de frais à partir d'un grand échantillon. On a déjà donné, dans la section 2 de ce chapitre des exemples d'estimations par le quotient et par régression avec échantillonnage double. Un autre exemple classique en inventaire forestier est l'utilisation de la taille des unités d'échantillonnage comme paramètre auxiliaire pour l'estimation par le quotient des caractéristiques du peuplement. Dans les inventaires de forêts tropicales hétérogènes les unités finales sont très souvent de taille différente. Par exemple, si on utilise des bandes parallèles comme unités d'échantillonnage, leur surface peut varier du fait de la forme irrégulière de la zone inventoriée, de la strate ou des deux et du fait de la forte pente du terrain (si on mesure les dimensions des bandes en suivant le terrain et non pas horizontalement). Mais lorsqu'on utilise ce type d'estimation, il ne faut pas oublier que les estimations du ''quotient des moyennes'' sont biaisées et que ce biais doit être réduit au maximum (voir la note du paragraphe 422.112.1 du chapitre III).

32 Caractéristiques des unités d'échantillonnage

321 Echantillon de placeaux ou de points. L'échantillonnage de placeaux consiste en des modèles qui utilisent des éléments de surface comme unités d'échantillonnage ou de relevé (une même unité d'échantillonnage ou de relevé étant formée de deux ou trois parcelles de taille différente où sont relevés respectivement les différents paramètres - voir le paragraphe 23 du chapître V) alors que dans l'échantillonnage par points (ou par lignes) la taille des surfaces de relevé dans chaque unité est une fonction continue d'une caractéristique de l'arbre (par exemple sa surface terrière dans le cas d'un échantillonnage par points horizontal).

Dans ce dernier cas, les unités d'échantillonnage ou de relevé ne sont pas définies matériellement et on ne peut pas considérer toute la population à inventorier comme une collection, au sens strict, de points et de lignes pris comme ''unités'' d'échantillonnage. On a déjà étudié brièvement la facilité d'utilisation des modèles d'échantillonnage par points en forêt tropicale hétérogène (paragraphe 422.2 du chapitre III). Les études d'efficacité dans les forêts tempérées ont montré que l'échantillonnage par points horizontal est, en général, plus efficace mais cela n'a pas encore été démontré pour les forêts tropicales. De plus, une étude d'efficacité seule n'est pas suffisante et il faut prendre en considération d'autres facteurs tels que la valeur des données relevées - le choix des arbres à

relever est plus difficile dans un échantillonnage par points que dans un échantillonnage par parcelles - et l'avantage qu'il y a à obtenir, dans chaque unité, une image représentative de la forêt, que l'échantillonnage par points ne peut pas donner. Il existe certains dispositifs d'échantillonnage par points combinés pour lesquels on relève tous les arbres au-dessous d'un diamètre donné (disons 30 cm), à condition qu'ils se trouvent à l'intérieur de la parcelle circulaire dont on détermine le rayon en fonction de ce diamètre et du facteur de surface terrière utilisé pour le sondage, les grands arbres étant relevés conformément aux règles de l'échantillonnage par points.

322 Taille des unités de sondage. On admet généralement que le coefficient de variation C_v d'une caractéristique donnée du peuplement (par exemple le nombre d'arbres dépassant un diamètre donné, par unité de sondage) est lié à la surface de l'unité de sondage par la relation empirique suivante:

$$C_v = \frac{\sigma_y}{\bar{y}} = ka^{-c} \qquad (17)$$

où: σ_y est l'écart-type des valeurs du caractère y du peuplement, dans les unités de population

$\bar{y}$ est la moyenne du caractère par unité de sondage

a est la superficie des unités de sondage

k et c sont des constantes positives indépendantes de a.

On peut aussi écrire cette formule sous la forme logarithmique:

$$\log C_v = \log k - c \log a = K - c \log a$$

c vaut 0,5 lorsque la distribution des valeurs par unité de la caractéristique du peuplement est aléatoire comme dans le cas d'une distribution de Poisson. Cela se vérifie approximativement pour les paramètres liés à la fréquence des arbres d'essences faiblement représentées en forêt tropicale hétérogène (par exemple le nombre d'arbres - et le volume brut correspondant - des ''Acajous'' dans les forêts d'Afrique occidentale). Pour de nombreux autres paramètres des forêts tropicales, on trouve que c est plutôt inférieur à 0,5.

Il est intéressant de comparer les tailles différentes de l'unité de sondage dans un plan d'échantillonnage aléatoire non stratifié pour la même intensité de sondage. Nous avons alors:

$$na = \text{contante}$$

où n et a sont, respectivement, le nombre d'unités d'échantillonnage et la surface d'une de ces unités. Le pourcentage d'erreur type de y (valeur moyenne par unité d'un caractère y du peuplement) vaut:

$$\frac{\sigma_{\bar{y}}}{\bar{y}} = \frac{C_y}{\sqrt{n}} = k' \left(C_v \sqrt{a}\right) = k'' a^{0,5-c} \qquad (18)$$

la dernière expression étant obtenue à partir de la formule empirique (17).

Pour la plupart des paramètres en forêt tropicale hétérogène, on aura $C < 0,5$. La formule (18) nous permet de conclure que pour une intensité de sondage donnée, plus les unités de sondage sont petites, meilleure est la précision. Il est cependant utile que chaque unité de sondage donne une image assez représentative de la forêt, ce qui n'est possible que si les unités de sondage ont une taille suffisante: dans une forêt tropicale

hétérogène, une unité de sondage de 0,01 ha ne serait guère utile pour estimer le volume exploitable. De plus, le nombre total d'arbres limites est plus grand dans un échantillon composé d'un grand nombre de petites unités que dans un échantillon équivalent (même surface totale) formé d'un plus petit nombre d'unités de sondage plus grandes de même forme. La taille des unités de sondage choisie est donc un compromis entre les impératifs contradictoires de la précision du sondage d'une part, et de certains aspects pratiques d'autre part (représentativité des unités de sondage et fiabilité des données de base). On considère souvent qu'un acre (0,4 ha) ou 0,5 ha est un compromis acceptable pour la suface des unités dans les inventaires de forêt tropicale hétérogène.

323 Forme des unités de sondage

323.1 Placeaux circulaires d'une part et carrés ou rectangulaires d'autre part

Les principaux avantages des placeaux circulaires sont:

- pour une surface donnée le périmètre du cercle est plus petit que celui des autres formes géométriques d'où un nombre minimum d'arbres limites;
- une unité d'échantillonnage circulaire donne une image isotropique de la forêt, autour du centre.

Son utilisation en zone tempérée augmente, mais il ne faut pas oublier que, pour des raisons pratiques, la forme de ces placeaux est, en fait, elliptique lorsqu'il y a une pente. (Des appareils intéressants utilisant un viseur et une mire à repères ajustables pour évaluer ce type de placeau sont cités dans le Forest Inventory de Loetsch-Zöhrer-Haller, Volume II, pages 324-325 et dans la Dendrométrie de Pardé, pages 190-199).

Cependant, le milieu difficile et le besoin de plus grandes unités empêchent d'utiliser la forme circulaire pour les unités de sondage en forêts tropicales hétérogènes (mais pas pour les unités de relevé: voir paragraphe 324.3, ci-dessous). On préfère souvent en forêt tropicale hétérogène des unités de sondage (et les unités de relevé) carrées ou rectangulaires. Ces unités peuvent être des bandes d'une largeur donnée (en général de 10 à 25 mètres) disposées le long de lignes de pénétration parallèles ouvertes au travers du sous-bois et traversant toute la zone inventoriée ou une partie ou bien une strate de celle-ci. Leur largeur ne devrait pas dépasser 30 mètres - par exemple 15 mètres de part et d'autre de l'axe du layon - afin de permettre un bon contrôle de l'opération de relevé. On peut mesurer cette largeur soit horizontalement soit en suivant le terrain. Dans le premier cas, on n'aura pas de correction à faire dans la détermination de la surface de la bande, mais le relevé est alors plus long et il risque d'être moins sûr du fait des arbres limites. La deuxième méthode peut être plus sûre mais elle impose de mesurer les pentes transversales et demande plus de calculs. Les unités de sondage peuvent aussi être soit des placeaux rectangulaires soit des lignes de placeaux rectangulaires. Dans ce dernier cas, les placeaux sont les unités de relevé et non pas les unités de sondage. On ne peut pas utiliser les placeaux comme unités de sondage car la distance entre deux placeaux consécutifs le long de la ligne n'est pas suffisante pour assurer l'indépendance statistique par rapport aux paramètres à mesurer (voir paragraphe 322.2 du chapitre III).

323.2 Forme des placeaux rectangulaires

On a trouvé, dans une étude faite au Cameroun que, pour un placeau rectangulaire de taille donnée, plus la forme est allongée, meilleure est la précision mais cet effet est moins important que celui de la taille. Cela ne vaut d'ailleurs pas pour des bandes très longues (surface unitaire de plus de 5 hectares) auquel cas des bandes très larges (de 100 mètres et plus) donnent une meilleure précision. L'utilisation de ces placeaux très larges ne serait naturellement pas possible en pratique pour l'inventaire de forêts tropicales hétérogènes.

323.3 Grappes

Dans les inventaires de forêts tropicales hétérogènes, les unités de sondage sont souvent des groupes ou des grappes de placeaux circulaires, ce qui permet de profiter des avantages des placeaux circulaires tout en ayant des unités de sondage assez grandes. Les placeaux circulaires sont alors les unités de relevé et elles sont souvent disposées le long d'une droite ou le long des côtés d'un carré ou d'un rectagle ("tracts" de certains inventaires forestiers nationaux européens). Cependant, pour une même taille d'unité de sondage une grappe de placeaux circulaires peut avoir un périmètre total supérieur à celui de l'unité de sondage rectangulaire équivalente (et donc plus d'arbres limites. Par exemple, une grappe de cinq placeaux circulaires de 0,1 ha a un périmètre total plus long qu'un rectangle de 200 mètres de long sur 25 mètres de large (environ 560 mètres contre 450 mètres).

Une fois que l'on a fixé la taille des placeaux circulaires (unité de relevé) il faut décider la taille unitaire d'une unité de sondage c'est-à-dire le nombre M de placeaux que comprend chaque unité de sondage. Il s'agit là d'un problème d'optimisation où M est une des caractéristiques de plan de sondage qui doit être déterminée. Le paragraphe suivant, en partie extrait de Sampling Techniques par Cochran (2ème édition, pages 244-247), donne une exemple d'un tel procédé d'optimisation.

Considérons un échantillonnage aléatoire non stratifié ayant n grappes égales (unités de sondage) de M placeaux circulaires chacune. La variance de la moyenne $\bar{y}$ par placeau circulaire (unité de relevé) d'une caractéristique donnée du peuplement vaut:

$$v(\bar{y}) = \frac{S_b^2}{nM} \qquad (19)$$

où S_b^2 est la variance entre grappes (variance entre les valeurs totales de y dans les grappes rapportée aux placeaux.

Le premier problème est d'estimer S_b^2 à partir des variances des valeurs de y dans les placeaux circulaires, c'est-à-dire S_w^2, variance des valeurs de y dans les M placeaux d'une grappe, et S^2, variance des valeurs de y dans les placeaux circulaires de toute la zone inventoriée.

On a approximativement: $S_b^2 \# MS^2 - (M - 1)\, s_w^2$ (20)

(ce résultat est obtenu par une analyse de variance de y sur toute la population)

Dans de nombreux inventaires, on a trouvé que S_w^2 peut être exprimé par la formule empirique suivante:

$$S_w^2 = AM^g$$

où A et g sont des constantes positives, indépendantes de M.

Si l'on a une fonction-coût du même type que celle indiquée au paragraphe 313 ci-dessus pour des plans d'échantillonnage à deux degrés, comme par exemple:

$$C = nC_1 + nMC_2$$

(où C_1 et C_2 ont la même signification qu'au paragraphe 313, la grappe étant considérée l'unité primaire et le placeau circulaire comme l'unité secondaire).

Le problème d'optimisation se ramène alors à la recherche des valeurs de M (et de n) minimisent:

$$v(\bar{y}) = \frac{S^2 - (M - 1)\, AM^g - 1}{n} \qquad (21)$$

pour un coût total donné: $C = nC_1 + nMC_2 = C_o$ (22)

En utilisant le procédé indiqué au paragraphe 341 du chapitre III, on peut trouver, facilement, que la valeur optimale Mo de M est donnée par l'équation suivante:

$$AM_o^{g-2} (C_2M_o^3 + C_1M_o^2 - C_1M_o^2 + C_1) - C_2S^2 = o$$

La valeur correspondante n_o du nombre de grappes est déterminée en remplaçant M par M_o dans l'équation (22).

4 Inventaire forestier continu

41 Définition et utilisation

Par l'inventaire forestier continu on entend tout dispositif d'inventaire forestier dans lequel on a recours à des échantillonnages successifs. Cette définition est beaucoup plus large que celle de l'inventaire forestier continu d'Amérique du Nord (CFI) qui utilise le même échantillon dans tous les inventaires successifs (toutes les unités d'échantillonnage sont dites ''permanentes'').

Des échantillonnages successifs peuvent être envisagés dans la conception d'un inventaire forestier quand, en plus de l'état actuel de la forêt, il faut déterminer avec précision les changements intervenus à condition que les usagers puissent attendre le temps nécessaire, parfois long, pour obtenir ces renseignements.

Si l'on recueille des renseignements sur la croissance c'est que l'on admet que la forêt sera aménagée d'une façon continue. Bien que l'aménagement forestier en soit à peine à ses debuts - ou n'ait pas même commencé - dans de nombreux pays tropicaux, les techniciens d'inventaire ne devraient pas oublier que ces inventaires continus sont nécessaires pour l'aménagement et ils devraient les entreprendre chaque fois qu'ils estiment probable que la forêt sera aménagée et que leur travail sera utile. Il faut à cet égard entendre l'aménagement forestier dans son sens large. La surveillance du couvert forestier à l'aide de parcelles permanentes sur des images de télédétection représente un domaine important d'application de l'inventaire permanent qui intéresse non seulement l'aménagement forestier au sens strict mais aussi la politique d'utilisation des sols et l'environnement.

42 Description du dispositif

421 Différents types d'inventaires forestiers continus

L'échantillonnage répété en inventaire a trois objectifs:

1. estimer les caractéristiques de la forêt au cours du premier inventaire;
2. répéter l'opération lors du deuxième inventaire;
3. estimer les modifications intervenues entre les deux inventaires. (On peut ainsi répéter indéfiniment l'opération, l'inventaire précédent étant chaque fois considéré comme ''premier inventaire'').

On peut obtenir ces renseignements par quatre procédés principaux:

1. On tire un nouvel échantillon pour chaque inventaire. Les unités d'échantillonnage au temps 2 diffèrent de celles du temps 1.
2. On mesure les points d'échantillonnage du premier inventaire lors du deuxième et des autres inventaires successifs. C'est la notion de parcelles échantillons permanentes qui est à la base de l'Inventaire forestier continu (CFI) en Amérique du Nord.
3. Lors du deuxième inventaire on mesure de nouveau une partie des unités d'échantillonnage initiales et on en prend d'autres. On a alors des échantillonnages successifs avec renouvellement partiel de l'échantillon (SPR).
4. Lors du deuxième inventaire on reprend une partie des unités du premier.

422 Echantillonnage avec renouvellement partiel (SPR). La troisième de ces méthodes, échantillonnages successifs avec renouvellement partiel de l'échantillon, est la plus efficace. Si l'on envisage des inventaires successif, les inventoristes devront choisir leur dispositif en conséquence.

On en donnera ici qu'un aperçu succinct du dispositif et une analyse de cette seule méthode. Pour plus de détails, se reporter à Ware et Cunia (1962) On trouvera une bonne description de cette méthode et des trois autres types d'échantillonnages repétés dans F. Loetsch et K. Hallern Forest Inventory (volume 1, pages 259 à 277).

Il y a deux types d'unités d'échantillonnage dans l'inventaire initial qui sont: les unités qui ne sont mesurées que lors du premier inventaire (non reprises) et celles qui ont été mesurées une première fois et qui doivent être remesurées lors du deuxième inventaire (reprises). Lors du deuxième inventaire, une partie des unités tirées lors du premier inventaire seront mesurées (unités reprises). Il y aura, en outre, des parcelles nouvelles. Les notations nécessaires concernant les nombres d'unités d'échantillonnage et les observations sont les suivantes:

Premier inventaire

u = nombre d'unités d'échantillonnage tirées lors du premier inventaire et non reprises

x_{ui} = valeur mesurée du paramètre (caractéristique du peuplement) mesuré sur les unités d'échantillonnage du premier inventaire non reprises

m = nombre d'unités d'échantillonnage du premier inventaire reprises

x_{mj} = valeur mesurée du paramètre lors du premier inventaire sur les unités d'échantillonnage reprises

$u + m = n_1$ = nombre total d'unités d'échantillonnage du premier inventaire

Deuxième inventaire

m = nombre d'unités d'échantillonnage reprises tirées lors du deuxième inventaire (le même que le m du premier inventaire)

y_{mj} = valeur mesurée du paramètre (le même que x) lors du deuxième inventaire sur les unités d'échantillonnage reprises

n = nouvelles unités d'échantillonnage tirées dans le deuxième inventaire

y_{nk} = valeur mesurée du paramètre (le même que x) lors du deuxième inventaire sur de nouvelles unités d'échantillonnage

$m + n = n_2$ = nombre total d'unités d'échantillonnage du deuxième inventaire

On a alors:

$$\bar{x}_u = \frac{\sum_{i=1}^{u} x_{ui}}{u}$$ moyenne des valeurs du paramètre par unité d'échantillonnage, mesurées la première fois sur les unités non reprises

$$\bar{x}_m = \frac{\sum_{i=1}^{m} x_{mj}}{m}$$ moyenne des valeurs du paramètre par unité d'échantillonnage mesurées la première fois sur les unités reprises

$\bar{y}_m = \frac{\sum_{j=1}^{m} y_{mj}}{m}$ moyenne des valeurs du paramètre par unité d'échantillonnage mesurées lors de la deuxième phase sur les unités reprises

$\bar{y}_n = \frac{\sum_{k=1}^{n} y_{nk}}{n}$ moyenne des valeurs du paramètre par unité d'échantillonnage mesurées lors de la deuxième phase sur les unités non reprises.

a) Estimation des moyennes par unité d'échantillonnage lors du premier et du deuxième inventaire

1. L'estimation $\bar{x}$ de la moyenne du paramètre par unité d'échantillonnage du premier inventaire est:

$$\bar{x} = \frac{m\bar{x}_m + u\bar{x}_u}{n_1} = \frac{\sum_{j=1}^{m} x_{mj} + \sum_{i=1}^{u} x_{ui}}{n_1}$$

2. La meilleure estimation $\bar{y}$ de la moyenne du paramètre par unité d'échantillonnage du deuxième inventaire est donnée par:

$$\bar{y} = a(\bar{x}_u - \bar{x}_m) + c\bar{y}_m + (1-c)\bar{y}_n$$

où :
$$a = \frac{m(\frac{u}{n_1})r\,\frac{s_y}{s_x}}{n_2-(\frac{u}{n_1})nr^2}$$

$$c = \frac{m}{n_2-(\frac{u}{n_1})nr^2}$$

avec:
$$s_x^2 = \frac{\sum^{n_1} x^2 - \frac{(\sum^{n_1} x)^2}{n_1}}{n_1 - 1} \qquad \left(\sum^{n_1} x = \sum_{i=1}^{u} x_{ui} + \sum_{j=1}^{m} x_{mj} \right.$$

$$\left. \sum^{n_1} x^2 = \sum_{i=1}^{u} x_{ui}^2 + \sum_{j=1}^{m} x_{mj}^2 \right)$$

$$s_y^2 = \frac{\sum^{n_2} y^2 - \frac{(\sum^{n_2} y)^2}{n_2}}{n_2 - 1}$$

($\sum^{n_2} y$ et $\sum^{n_2} y^2$ sont obtenus comme $\sum^{n_1} x$ et $\sum^{n_1} x^2$)

et:
$$r = \frac{\sum_{j=1}^{m} (x_{mj}-\bar{x}_m)(y_{mj}-\bar{y}_m)}{\sqrt{\sum_{j=1}^{m} (x_{mj}-\bar{x}_m)^2 \sum_{j=1}^{m} (y_{mj}-\bar{y}_m)^2}}$$

Une estimation de la variance de $\bar{y}$, $v(\bar{y})$, est donnée par:

$$v(\bar{y}) = a^2 \left(\frac{1}{u} + \frac{1}{m}\right) s_x^2 + \left[\frac{c^2}{m} + \frac{(1-c)^2}{n}\right] s_y^2 - 2\frac{ac}{m} r s_x s_y$$

que l'on peut exprimer plus simplement par:

$$v(\bar{y}) = \frac{1 - \frac{u}{n_1} r^2}{n_2 - \left(\frac{u}{n_1}\right) n r^2} s_y^2 = \frac{c}{m}\left(1 - \frac{u}{n_1} r^2\right) s_y^2$$

b) Estimation de la différence des valeurs moyennes du paramètre par unité d'échantillonnage, entre le premier et le deuxième inventaire.

Lorsque le paramètre indiqué par x et y est un volume, cette différence exprimera la croissance du peuplement correspondant à ce volume pour la période séparant les deux inventaires.

La meilleure estimation de cette croissance moyenne par unité d'échantillonnage est donnée par l'équation:

$$g = A\bar{y}_m + (1-A)\bar{y}_n - B\bar{x}_m - (1-B)\bar{x}_u$$

où:

$$A = \frac{m + n\left(\frac{m}{n_1}\right) r \frac{s_x}{s_y}}{n_2 - \left(\frac{u}{n_1}\right) n r^2}$$

$$B = \frac{m\left(\frac{u}{n_1}\right) r \frac{s_y}{s_x} + n_2\left(\frac{m}{n_1}\right)}{n_2 - \left(\frac{u}{n_1}\right) n r^2}$$

Une estimation de la variance de g est donnée par:

$$v(g) = \frac{A^2 s_y^2 + B^2 s_x^2 - 2ABr s_x s_y}{m} + \frac{(1-A)^2 s_y^2}{n} + \frac{(1-B)^2 s_x^2}{u}$$

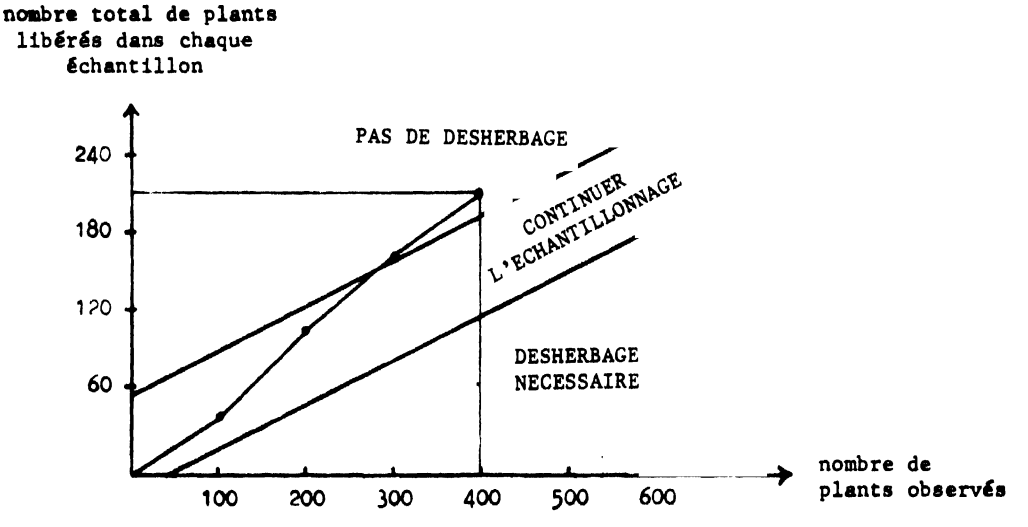
que l'on peut aussi écrire:

$$v(g) = \frac{1}{n_2 - \left(\frac{u}{n_1}\right) n r^2}\left[\left(1 - \frac{u}{n_1} r^2\right) s_y^2 + \left(\frac{n_2}{n_1} - \frac{n r^2}{n_1}\right) s_x^2 - 2\frac{nr}{n_1} s_x s_y\right]$$

5 Sondage séquentiel

Le sondage séquentiel, comme l'inventaire forestier permanent, comporte une série d'échantillons, mais dont chacun comprend toutes les unités d'échantillonnage du précédent (u = o quel que soit l'échantillon). De plus, le temps écoulé entre deux échantillons successifs est négligeable si bien que, du point de vue forestier, on peut considérer tous les échantillons comme simultanés.

Le sondage séquentiel a pour but de permettre de prendre une décision relative à une population (peuplement forestier) de façon suffisamment assurée à partir d'un nombre limité d'unités de cette population. Considérons l'exemple d'une plantation pour laquelle il faut décider si un désherbage est nécessaire. Supposons aussi que l'on puisse diviser cette surface en lignes (unités) égales, de vingt plants. On choisira les lignes au hasard pour constituer les échantillons successifs et on enregistrera le nombre total de plants libérés (c'est-à-dire pour lesquels le désherbage n'est pas nécessaire). On représentera chaque échantillon tiré (le deuxième échantillon comprend toutes les lignes du premier plus d'autres, et ainsi de suite) par un point sur un graphique, l'abscisse de ce point étant la taille de l'échantillon (nombre total de plants observés) et l'ordonnée le nombre total de plants de l'échantillon qui sont libérés. On trace, en outre, sur ce ''graphique de sondage séquentiel'' deux lignes parallèles qui le divisent en trois régions: ''pas de désherbage'', ''continuer le sondage'' et ''désherbage nécessaire''.



Si les points représentant les derniers échantillons restent dans la région ''pas de désherbage'' (comme dans la Figure 1) on peut arrêter le sondage et décider de ne pas désherber. S'il restent dans la région ''désherbage nécessaire'', un sondage supplémentaire est inutile et on décide de commencer le désherbage. S'ils appartiennent à la région ''continuer le sondage'', on ne peut pas prendre de décision sûre et il faut continuer le sondage.

Les pentes et les ordonnées à l'origine des deux lignes parallèles sont les éléments de base de cette méthode de sondage. Elles sont fonction des éléments suivants:

- distribution du ''paramètre de décision'' dans la population étudiée (dans l'exemple précédent, c'est le nombre de plants libérés par ligne) qui peut être assimilée, pour simplifier, à une distribution classique telle que la distribution binomiale ou celle de Poisson.

- La proportion minimale de plants libérés dans une ligne, à partir de laquelle on décide que cette ligne n'a pas besoin d'un désherbage (disons 60% ou 12 plants), (proportion admissible de plants libérés);

- la proportion maximale de plants libérés dans une ligne, en dessous de laquelle on décide que cette ligne a besoin de désherbage (soit 50% ou 10 plants), (proportion inadmissible de plants libérés);

- les deux risques admissibles suivants, exprimés en pourcentages de probabilité:
  - risque de désherber la plantation bien que le nombre d'arbres libérés soit suffisant (risque de ''rejet'' ou ''risque du fournisseur'');
  - risque de ne pas désherber la plantation bien qu'en fait, la proportion d'arbres libérés soit insuffisante (risque d'''acceptation'' ou ''risque du client'').

Lorsque la distribution est connue et que les quatre seuils ci-dessus sont définis, il est possible de tracer sur le graphique les lignes qui permettront de prendre la décision. On trouvera une description détaillée de la méthode et des formules correspondantes dans Forest Inventory de F. Loetsch et K.Haller (volume I, pages 278 à 289).

Bien que ce procédé paraisse intéressant, il est assez peu appliqué dans le domaine forestier, en particulier parce que la distribution des paramètres forestiers est peu connue. Un autre inconvénient est qu'en forêt tropicale hétérogène, toutes les unités d'échantillonnage doivent être tirées au hasard, ce qui augmente le coût total d'accès inhérent à la procédure de sondage. Il a été utilisé dans le domaine forestier pour des études de régénération et des études sur les maladies et les insectes.

ANNEXE I

EXEMPLE DE SPECIFICATIONS TECHNIQUES

à prévoir dans un contrat de couverture aérienne

1. SPECIFICATIONS DE L'APPAREIL PHOTOGRAPHIQUE

a) La photographie aérienne verticale doit être faite avec un appareil de précision à objectif simple de 21 cm de distance focale et un format 18 cm x 18 cm. L'appareil doit être de type moderne à haute précision tel que le Wild RC 5, le RC 8 ou le Zeiss RMK 15/23 équipé d'un objectif à forte résolution capable de produire la meilleure qualité de photographie avec un film panchromatique ou infra-rouge. Les détails concernant l'appareil photographique, l'objectif et les filtres que l'adjudicataire doit utiliser pour ce contrat devront être donnés à l'Organisation 1/ et précisés dans le contrat.

b) Lorsque l'adjudicataire désire introduire une fenêtre ou une trappe transparente entre l'appareil et le sol il s'assurera que cette fenêtre ou trappe a été complètement vérifiée moins de six mois avant la date prévue pour le début des photographies en ce qui concerne l'homogénéité, la résolution et l'absence de distorsion. Un certificat de vérification sera soumis à l'organisation avec les rapports d'étalonnage décrits dans la Section 3 des spécifications. Le service s'assurera que cette fenêtre ou cette trappe est parfaitement propre et exempte de taches à tout moment.

c) Toute la surface du plan focal de la plaque de l'appareil doit être horizontale, à 0,005 mm près, dans les conditions d'utilisation. Le film doit être maintenu horizontal à 0,005 mm près dans le plan focal, uu moment de l'exposition. La plaque de l'appareil doit être vérifiée avec des contraintes d'utilisation doubles. La plaque ainsi étalonnée sera donc identifiée sans équivoque par une marque apposée sur le cône ou d'après le numéro du magasin de film de l'unité, et cela définitivement. Ce numéro d'identification sera cité dans le rapport de vérification.

d) L'adjudicataire emploiera des obturateurs entre lentilles tels que la lumière soit transmise simultanément à toutes les parties du plan de l'émulsion lorsqu'ils sont ouverts. L'efficacité de l'obturateur sera au moins de 75 pour cent de la valeur nominale à la vitesse la plus rapide. Dans les essais à température ambiante les vitesses seront d'une précision d'au moins 10 pour cent de la valeur nominale. On enregistrera les résultats de l'examen d'efficacité et sa date.

e) Lorsque l'appareil est équipé d'un altimètre à pression on reliera celui-ci au système de stabilisation de l'avion. L'altimètre couplé automatiquement à l'appareil photographique doit être étalonné avant le début de chaque vol photographique pour donner la même valeur que l'altimètre de l'avion.

f) Lorsque l'appareil est équipé d'une horloge qui enregistre le temps d'exposition, il faudra la contrôler pour corriger l'heure locale avant chaque vol.

2. ETALONNAGE DE L'APPAREIL PHOTOGRAPHIQUE

a) Il faudra étalonner avant le vol chaque unité optique de l'appareil photographique qui sera utilisée pour exécuter le contrat. Cela doit être fait par une autorité compétente et approuvé par l'Organisation. Les rapports soumis devront être conformes à la section 3 ci-dessous. L'intervalle entre l'étalonnage et la photographie doit être aussi court que possible et ne doit, en aucun cas, dépasser un an.

b) Le calibrage de l'unité optique doit être fait dans les mêmes conditions que celles de la mission et avec un filtre placé dans la même position. Il ne faudra, ensuite,

---

1/ Par Organisation on entend ci-après la partie qui propose le contrat.

faire aucun ajustement ou réparation qui puisse jouer sur l'étalonnage. Si l'unité optique est modifiée accidentellement, on ne prendra pas d'autres photographies avec elle et on la remplacera par une autre qui a été calibrée et approuvée par l'Organisation.

3. RAPPORTS D'ETALONNAGE

Un rapport d'étalonnage sera soumis à l'Organisation pour chaque appareil photographique, et contiendra les renseignements suivants:

a) Un certificat d'étalonnage indiquant le nom de l'autorité compétente, la date et le lieu d'étalonnage, le numéro de fabrication de l'unité optique de l'appareil, le numéro de fabrication de l'objectif et de la plaque.

b) Les coordonnées du point principal d'auto-collimation par rapport aux marques de référence.

c) Les distorsions radiales de l'image par rapport au point principal d'auto-collimation au zéro qui sont mesurées vers l'extérieur à des intervalles inférieurs 7 1/2° vers les repères de fond de chambre ou les croisillons d'angles (la moyenne arithmétique de ces distorsions ne sera pas acceptée). L'assymétrie des distorsions ne devra pas dépasser 0,03 mm.

d) La distance principale à laquelle s'appliquent ces distorsions.

e) La distance entre les marques de référence.

f) La résolution moyenne de l'image déterminée sur deux diagonales à un intervalle d'au moins 7 1/2°, selon la méthode standard de l'autorité compétente.

g) Toutes les mesures seront relevées au centième de millimètre près.

h) Ces rapports seront conservés par l'Organisation.

4. ECHELLE

La photographie sera prise à une hauteur de vol telle que l'échelle moyenne de contact de toute épreuve soit ..... L'écart par rapport à l'altitude prescrite ne devra pas dépasser 5 pour cent.

5. RECOUVREMENT

Le recouvrement longitudinal entre les photographies successives d'une même bande sera de 60 pour cent avec des tolérances de moins 5 pour cent ou plus 10 pour cent. Les recouvrements latéraux entre les photographies de chaque bande adjacente sera de 30 pour cent avec des tolérances de moins 15 pour cent ou plus 20 pour cent. L'Organisation peut cependant, dans certains cas, accepter des photographies où les recouvrements maxima (70 pour cent et 50 pour cent respectivement) soient dépassés à cause du terrain. Chaque fois que la variation altimétrique du sol altère significativement l'échelle de contact de la photographie, il faudra augmenter le recouvrement longitudinal, qui ne pourra alors, en aucun cas, être inférieur à 35 pour cent,pour compenser le fait que l'échelle est plus grande sur tout ou partie de la bande. L'augmentation correspondante du recouvrement transversal qui ne devra, en aucun cas, être inférieure à 10 pour cent, devra être effectuée pour toute la bande touchée par cette distorsion due aux variations d'altitude.

6. VOL EN CRABE

Il ne doit pas dépasser 5 pour cent ni provoquer des vides dans la couverture stéréoscopique de la zone étudiée.

7. INCLINAISON DE L'APPAREIL PHOTOGRAPHIQUE

Elle ne devra pas dépasser 3° pour chaque épreuve. L'inclinaison moyenne pour toute section de 10 épreuves ne dépassera pas 2° et elle ne dépassera pas 1° pour l'ensemble des photographies produites.

8. EFFETS COMBINES DU RECOUVREMENT, DU VOL EN CRABE, DE LA DERIVE ET DE L'INCLINAISON

(Applicable à la cartographie photographique). Tout point situé à un dixième de la largeur d'une photographie du bord latéral doit se trouver sur trois photographies successives d'une même ligne de vol et sur trois photographies de la ligne de vol adjacente.

9. LIGNES DE VOL

La zone sera parcourue par des lignes parallèles survolées dans une direction donnée et ces lignes de vol ne devront pas s'écarter de plus de cinq degrés de la direction prescrite théorique.

10. JONCTION DES BANDES

Lorsque le bout d'une bande rejoint le bout d'une autre bande parcourue dans la même direction générale le recouvrement de la première bande sur la seconde sera de 4 photographies.

11. NUAGES

Les nuages ne devront pas se trouver sur le point principal d'une photographie et ils ne devront pas recouvrir les points de contrôle au sol. La totalité de la zone nuageuse et/ou des ombres dues aux nuages ne devra pas dépasser 5 pour cent de la surface d'une photographie.

12. HEURE DE PRISE DE VUE

Le détail photographique ne devra pas être recouvert par les ombres des accidents topographiques dues au faible angle d'incidence des rayons solaires ni par la présence de ''taches claires''.

13. FILM ET FILTRE

Ils seront déterminés suivant les contrats.

14. QUALITE DES PHOTOGRAPHIES ET DEVELOPPEMENT

a) Les photographies sont indispensables pour la cartographie détaillée des formations forestières et pour les études de photointerprétation. Elles devront donc être de la plus haute qualité photographique en fonction des critères suivants:

b) L'émulsion du film et son support seront déterminés en fonction de chaque cas. Le support du film devra avoir une distorsion différentielle minima et les négatifs devront être exempts de taches, rayures, marques, poussières, de taches de toute sorte et d'empreintes statiques ou digitales.

c) Il faut prendre des précautions afin d'éviter la distorsion du film lors du développement.

d) Tous les repères devront être distingués sur chaque photographie.

e) Toutes les données enregistrées automatiquement telles que la hauteur du vol, l'heure de la prise de vue et la distance focale calibrée doivent être visibles sur chaque épreuve.

f) Les négatifs sont développés par contact. La densité, le contraste, et l'absence de brouillard sur les négatifs doivent être tels que des papiers à grain ''normal'' suffisent pour la plupart des négatifs sans qu'il y ait d'obscurcissements excessifs et cela avec un temps d'exposition raisonnable.

g) La définition et le contraste des négatifs seront tels que les épreuves montrent suffisamment de détails pour toute la gamme des teintes sur la photographie, et tels que l'identification des détails d'une photographie à l'autre soit possible avec certitude.

h) Les épreuves seront faites avec une tireuse électronique.

i) L'hyposulfite résiduel de chaque épreuve ne doit pas dépasser 0,023 mg par centimètre carré et l'argent résiduel ne doit pas dépasser 0,01 mg par mètre carré.

j) Les épreuves seront coupées afin de laisser un bord tout au plus de 6 mm sur les 3 côtés. Sur le bord où sont inscrites les images des instruments enregistrées automatiquement par l'appareil photographique, il faudra que la marge soit assez grande pour les contenir.

15. MARQUAGE DES FILMS ET DES NEGATIFS

a) Il faudra numéroter systématiquement chaque épreuve de la ligne de vol. Le numéro sera placé sur le coin Nord-Est ou Sud-Ouest du négatif. Les caractères ne seront pas inférieurs à 4 mm ni supérieurs à 6 mm. Le même numérotage sera repris pour les lignes de vol consécutives (par exemple, les trois premières épreuves de la ligne de vol 5 seront numérotées 5-1, 5-2 et 5-3). Tous les négatifs seront numérotés, qu'ils soient à l'intérieur ou en dehors des zones déterminées, et qu'ils soient ou non conformes aux spécifications, sauf si ces négatifs sont évidemment inutilisables (par exemple recouverts complètement par des nuages).

b) Le film sera continu, sans jointures, à l'exception du début et de la fin qui auront au moins 1 mètre de longueur. Le début des films peut contenir des négatifs non désirés. Les films reçoivent un numéro de film attribué par l'Organisation et qui figurera à la fin de chaque film.

c) La marge du premier et du dernier négatif de chaque ligne de vol devra indiquer clairement:

   i) Les codes indiqués par l'Organisation, le nom de la localité et le numéro de contrat.

   ii) Le numéro du film.

   iii) La date ou les dates de prises de vues, le mois en lettres et non en chiffres.

   iv) L'heure de prise de vues en heure locale.

   v) Le numéro de l'unité optique de l'appareil et de l'objectif et la distance principale correspondant aux calibrages spécifiés.

   vi) L'altitude au-dessus du niveau moyen de la mer, en mètres.

d) Un titre figurera dans la marge Nord ou Sud de chaque épreuve.

e) Le titre désiré sur chaque épreuve devra être en lettres majuscules claires (entre 3 mm et 5 mm de hauteur pour les points (i) à (v) ci-dessous, et entre 4 mm et 6 mm pour (vi) ci-dessous) et il devra indiquer, chronologiquement, les points suivants:

   i) L'indication de l'Organisation (un titre de projet approprié).

ii) L'altitude moyenne de vol au-dessus du niveau moyen de la mer, en mètres.

iii) La distance focale de l'appareil (en mm) si elle n'est pas inscrite automatiquement sur le négatif.

iv) La date de prise de vues.

v) Le numéro de la carte géographique correspondante.

vi) Le numéro de ligne et de photographie.

Exemple d'inscription complète:

FAO NIC/68/509 - 3230 M - 153,4 mm - 6 SEPT 72 - 12 - 1 - 18

16. RAPPORTS SUR LES FILMS

a) A chaque film sera joint un rapport contenant les points suivants ainsi que d'autres qui peuvent s'avérer importants:

Le numéro du contrat
Le nom de la société
Le numéro du film
Le nom de la région
L'heure de la première et de la dernière prise de vues (heure locale)
La date de la prise de vues
Le numéro de série de l'unité optique de l'appareil, du magasin de film et de l'objectif.
La distance principale donnée par le rapport d'étalonnage ayant les précisions désirées.
L'ouverture de l'objectif et les numéros des négatifs correspondant à un changement d'ouverture.
Le filtre. La vitesse d'obturation.
La marque et le nom du film, numéro de série et date de fabrication (si elle est connue).
L'immatriculation de l'avion.
Hauteur au-dessus du niveau de la mer et numéro des négatifs correspondant aux limites des changements de hauteur.
Conditions météorologiques.

b) On donnera la liste de tous les négatifs numérotés du film par séquences numériques et en deux colonnes et en faisant des remarques telles que:

PHOTOGRAPHIES		REMARQUES
Proposées	Supplémentaires	
1-1 à 1-20		Conformes aux spécifications
1-21 à 1-25		Quelques nuages
	1-26 à 1-36	Beaucoup de nuages
1-37 à 1-40		Conformes aux spécifications
	1-41 à 1-60	Recouvrement latéral insuffisant, survolé de nouveau

c) Même si les renseignements de ce paragraphe ne sont pas complets par rapport aux documents originaux élaborés sur le terrain, ils seront soumis en entier avec les deux copies du rapport final sur le film.

d) Indications générales sur la qualité photographique.

17. MARQUAGE DES BOITES DES FILMS

Sur le côté de chaque boîte on fixera une inscription indiquant:

1. Le numéro de contrat
2. Le nom du pays ou de la région (en caractères majuscules)
3. Le nom de la localité
4. Le nom de la société
5. La(les) date(s) des prises de vues
6. Le numéro du film
7. Le premier et le dernier numéro de chaque bande du film
8. Le numéro de série de l'unité optique de l'appareil et de l'objectif

18. TABLEAUX D'ASSEMBLAGE

Les tableaux d'assemblage des lignes de vol seront fournis; ils peuvent varier pour chaque contrat.

19. AUTRES SPECIFICATIONS

Les clauses suivantes peuvent être comprises dans le corps du contrat:

(a) Contrôle et acceptation

i) L'Organisation se réserve le droit de refuser toute photographie qui ne serait pas conforme aux spécifications, dans un délai de six semaines après la livraison des épreuves.

ii) La société aura la possibilité de renoncer à être payée pour les photographies rejetées ou de produire des photographies de remplacement acceptables.

iii) Si l'Organisation trouve qu'une photographie n'est pas conforme aux spécifications ou qu'il y a des vides dans la couverture aérienne, l'adjudicataire corrigera ces défauts avant de poursuivre la couverture, si l'Organisation le lui demande.

b) Photographies supplémentaires

Les photographies supplémentaires, si elles existent, prises lors du contrat et situées en dehors des zones à photographier, indiquées par l'accord entre la société et l'Organisation peuvent être proposées à celle-ci. L'Organisation décidera alors si elle accepte une ou plusieurs de ces photographies.

ANNEXE II

BIBLIOGRAPHIE SELECTIONNEE ET ANNOTEE

La bibliographie ci-dessous ne cite que quelques-uns des documents les plus utiles sur les diverses techniques utilisées en inventaire forestier. Elle comprend surtout des livres ou des manuels; les articles ou les communications n'ont été choisis que lorsqu'ils paraissent essentiels. A quelques exceptions près, toutes les références sont en anglais. Lorsqu'elles existent aussi en français et/ou en espagnol, cela est indiqué dans la marge par un F et/ou un S.

a) Inventaire forestier en général

L'inventaire forestier est généralement traité dans de(s) chapitre(s) particulier(s) de livres ou manuels de dendrométrie. Il peut cependant être l'objet de quelques publications, parmi lesquelles on peut retenir les suivantes:

Bonnor G.M. - 1972. Forest sampling and inventories. A bibliography. Forest Management Institute, Ottawa, Ontario. Rapport interne FMR-24, 27 pages.

Références choisies de publications anglaises; ne couvre pas l'échantillonnage par points, les mesures photogrammétriques ni les thèses.

FAO - 1967. Report of the Headquarters Meeting of Forest Inventory Experts on UNDP/SF Projects (Actes d'une réunion tenue à Rome les 11-12 septembre 1967). FO:SF/67 - IM 17, 259 pages.

Ces actes comprennent des communications des participants et les rapports et recommandations des divers groupes de travail. L'essentiel de ce document est repris dans le ''Manuel des opérations d'inventaire forestier réalisées par la FAO'' et dans le présent manuel.

Loetsch F. et Haller K.E. - 1964. Forest inventory. Volume 1, 436 pp.
Loetsch F., Zöhrer F. and Haller K.E. - 1973. Inventaire forestier. Volume 2, 469 pages. BLV Verlagsgesellschaft Munich - Bale - Vienne.

C'est à strictement parler le seul livre récent sur l'inventaire forestier; il couvre toute la gamme des techniques. Les particularités des inventaires forestiers tropicaux n'y sont pas omises (comme dans les livres antérieurs sur l'inventaire forestier) et les bibliographies des deux volumes sont très complètes.

Nyyssönen A. - 1961. Survey methods of tropical forests. Publié par la FAO, N° 13407.

Etude comparative des méthodes d'inventaire utilisée dans les tropiques à la fin des années cinquante.

b) Préparation d'un inventaire forestier (Chapitre II)

Husch B. - 1971 Planning a forest inventory. Etudes de la FAO sur les forêts et les produits forestiers. N° 17, 121 pages.

Il est indiqué dans la préface, cette étude sommaire ''met en relief les principaux problèmes et propose un ordre logique pour leur prise en considération. Elle traite aussi brièvement de certaines des techniques les plus modernes et examine leurs mérites et leurs limites d'application, mais ne prétend pas à une description des méthodes techniques''.

c) Techniques de base de sondage en inventaire forestier (Chapitre III)

Chacko V.J. - 1965. A manual on sampling techniques for forest surveys. 172 pages. Delhi. Manager of publication.

Cochran W.G. - 1963 (2ème édition). Sampling techniques. 413 pages. John Wiley and Sons Inc., New York.

Livre très clair sur techniques d'échantillonnage, décrivant et démontrant la plupart des dispositifs d'échantillonnage que l'on retrouve en inventaire forestier.

(F seulement) Desabie J. - 1966. Théorie et pratique des sondages. Dunod, Paris. 481 pages.

Livre simple et pratique, en français sur les techniques d'échantillonnage; vise plus particulièrement les sondages démographiques.

Freese F. - 1962. Elementary forest sampling. Agriculture Handbook N° 232. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, 91 pages.

Livre très utile et très pratique sur les techniques d'échantillonnage en inventaire forestier, donnant de nombreux exemples numériques. Recommandé par la plupart des spécialistes consultés lors de l'élaboration de ce manuel.

Hansen M.H., Hurwitz W.N. et Madow W.G. - 1953. Sample survey methods and theory. Volume 1 - Méthodes et applications. 638 pages. Volume II. Théorie. 332 pages. John Wiley and Sons Inc., New York.

Livre très complet visant plus particulièrement les sondages démographiques.

(F) Schumacher F.X. et Chapman R.A. - 1954. L'échantillonnage statistique dans la recherche forestière, la gestion des forêts, l'aménagement pastoral. 3ème éd. Trad. Nogent/Marne Centre technique forestier tropical, 1966, 224 pages. Duke University School of Forestry. Bulletin N° 7.

Utile Manuel de techniques d'échantillonnage pour l'inventaire forestier; mais les nouvelles méthodes telles que l'échantillonnage par points et le SPR ne sont pas traités.

Sukhatme P.V. - 1954. Sampling theory of surveys with applications. Iowa State College Press, Ames, Iowa. 491 pages.

Livre très connu traitant notamment des recensements agricoles.

(F) Yates F. - Méthodes de sondage pour recensements et enquêtes. 335 pages. Dunod Paris, 1951.

Ce livre est moins complet que celui de Cochran en ce qui concerne le nombre de méthodes d'échantillonnage et de démonstrations mais il donne plus d'explications et plus d'exemples numériques.

Sur l'échantillonnage par points ou par lignes

Grosenbaugh L.. - 1958. Point samming and line sampling: probability theory, geometric implications, synthesis. USDA Southern Forest Experiment Station. Occasional Paper N° 160.

Labau V.J. - 1967. Literature on the Bitterlich method of forest cruising. USDA Pacific Northwest Forest and Range experiment Station Research Paper PNW-19.

d) Télédétection et cartographie (Chapitre IV)

i) Mesures photogrammétriques en inventaire forestier

Pour les mesures photogrammétriques en inventaire forestier, la plupart des titres sont des articles et des communications. On trouvera des annotations sur ces références dans la bibliographie des documents et des livres suivants sur la photointerprétation (voir (iii)).

American Society of Photogrammetry - 1966 (3ème édition). Manual of photogrammetry. George Banta Co., Menasha, Wisconsin, 1220 pages. (2 volumes).

Nielsen U. - 1971. Tree and stand measurements from aerial photographs: an annotated bibliography. Forest Management Institute, Ottawa, Ontario. Internal report FMR-X-29. 111 pages.

Spurr S.H. - 1960 (2ème édition). Photogrammetry and Photointerpretation (avec une partie sur les applications en foresterie). New York, the Ronald Press Co. 472 pages.

ii) Classifications végétales et écologiques

Outre les documents cités dans la section 22 du chapitre IV, on citera:

Hordridge L.R. - 1967. Life zone ecology (édition revue). Centre Tropical Scientifique, San José, Costa Rica. 205 pages.

(F)(S) Unesco - 1972. Légende enternationale des cartes de la végétation. Ecologie et conservation N° 6. Paris 94 pages.

Classification très récente élaborée sous les auspices de l'Unesco.

iii) Photointerprétation en inventaire forestier

American Society of Photogrammetry - 1960. Manual of Photographic Interpretation. George Banta Co., Menasha, Wisconsin. 868 pages.

En plus de deux chapitres sur l'obtention de photographies aériennes et notations fondamentales de photointerprétation, un chapitre de 64 pages est consacré à la photointerprétation en foresterie.

Avery T.E. - 1966. Forester's guide to aerial photointerpretation. USDA Handbook N° 308. 40 pages.

Hildebrandt G. - 1968 - Bibliographie des Schrifttums auf dem Gebiet der forstlichen Luftbildauswertung, 1887 - 1968.

Howard J.A. - 1970. Aerial photo-ecology. Faber et Faber, Londres. 325 pages.

Livre très clair et très utile sur l'utilisation de la photographie aérienne, particulièrement pour l'étude de la végétation, bibliographie assez complète (35 pages).

Stellingwerf D.A. - 1966. Applications pratiques des photos aériennes aux tâches forestières et autres études de la végétation. Institut international de levés aériens et sciences de la terre. Publications I.T.C. Séries B. N° 36-37-38-46-47-48.

Cette série de manuels contient un nombre important de stéréogrammes montrant les types de végétation et de forêts dans les tropiques et en zone tempérée. Il est donc très utile pour la formation.

iv) Nouvelles techniques de télédétection

IUFRO, Section 25 - 1971. Application of remote sensors in Forestry. Rapport commun du groupe de travail ''Application des télédétecteurs en foresterie'', 189 pages.

Ce rapport contient 13 communiqués de forestiers spécialistes des techniques de télédétection. Il décrit bien l'application des nouvelles techniques à la foresterie en 1970.

American National Research Council - 1970. Remote sensing with special reference to Agriculture and Forestry. National Academy of Sciences, Washington D.C., 424 pages.

De nombreux spécialistes américains ont contribué à la réalisation de ce livre. Il donne à l'utilisateur des bases techniques sur la télédétection en général et sur ses applications pour l'étude de la végétation, du sol et des ressources forestières.

Krumpe P.F. - 1972. Remote sensing of terrestrial vegetation: a comprehensive bibliography. The University of Tennessee, Knoxville, Tennessee. 69 pages.

850 titres d'ouvrages traitant de l'utilisation et de l'application de la télédétection en foresterie, en agriculture et en écologie végétale, ainsi que des domaines connexes tels que l'aménagement du territoire, l'inventaire et l'aménagement des ressources ainsi que les analyses des sols et du terrain.

Wilson R.C. - 1970. Remote sensing application in forestry (Un rapport de recherche réalisé sous les auspices du laboratoire de télédétection forestier, Ecole de Foresterie et de Conservation, Université de Californie, Berkeley, pour la National Aeronautics and Space Administration). 199 pages.

Le sous-titre de ce rapport précise les applications possibles de la télédétection par satellites orbitaux pour l'étude des parcours et des forêts aux environs de 1980.

e) Problèmes de mesure (Chapitre V)

i) Dendrométrie

Husch B., Miller C.I. et Beers T.W. - 1971. Forest mensuration. The Ronald Press Co., New York. 410 pages.

Livre récent sur la dendrométrie comprenant quatre chapitres sur l'inventaire forestier et 16 pages de bibliographie (titres anglais pour la plupart).

(F seulement) Pardé J. - 1961. Dendrométrie. Editions de l'Ecole nationale des eaux et forêts, Nancy. 350 pages.

Livre très utile et très pratique sur la dendrométrie (mais avec peu de références aux forêts tropicales).

ii) Tarifs de cubage

Cunia T. - 1964. Weighted least square method and construction of volume tables. Forest Science, Volume 10, N° 12. 12 pages.

Premier document important sur l'utilisation de la régression pondérée pour l'élaboration des tarifs de cubage.

Draper N.R. et Smith H. - 1966. Applied regression analysis. John Wiley and Sons Inc.

Freese F. - 1964. Linear Regression Methods for Forest Research. USDA Forest Service Research Paper, FPL 17, 138 pages.

Manuel très clair sur les techniques de régression, avec des applications numériques.

Prodan M. - 1968. Forest Biometrics (traduction anglaise par S. Gardiner de ''Forstliche Biométrie'').

iii) Evaluation de la qualité et études de rendement

IUFRO, Section 25 - 1969. Compte rendu de la conférence tenue à Reinbek, Allemagne, par le groupe de travail sur ''les problèmes dendrométriques dans les inventaires forestiers tropicaux''. Mitt. Bundesforsch. anst. f. Forst - und Holzw. Komm. verl. Max Wiedebusch, Hamburg.

Compte rendu des débats et des documents soumis à cette conférence qui était surtout centrée sur l'évaluation de la qualité et sur les études de récolement.

iv) Accessibilité

Von Segebaden G. - 1969. Studies on the accessibility of forest and forest land in Sweden. Studia Forestalia Tecnica N° 76. 64 pages.

f) Relevé et traitement des données en inventaire forestier (Chapitre VI)

Anderson D.M. - 1966. Computer Programming FORTRAN IV. Appelton Century Crafts, New-York. 430 pages, y compris les annexes.

Manuel destiné aux débutants en programmation FORTRAN IV. Très valable pour l'auto-apprentissage et pour l'enseignement. Il comporte de nombreux graphiques, des exercices et une comparaison des compilateurs FORTRAN de différentes marques (séries IBM, Univac, Burroughs, General Electric, Honeywell, etc.).

Dawkins H.C. - 1968. STATFORMS. Formats for elementary statistical calculation. Commonwealth Forestry Institute, Oxford. Institute Paper N° 41.

26 feuilles pour les calculs manuels nécessaires dans des techniques statistiques telles que l'analyse de variance (carré latin) et de covariance, la régression linéaire, l'échantillonnage aléatoire stratifié, etc., indiquant les différentes étapes de calcul. Très utile pour de petits calculs manuels; exemples utiles.

Dixon W.J. - 1968. BMD - Biomedical Computer Programs. University of California Press, Berkeley and Los Angeles. 600 pages.

Collection de programmes standard (FORTRAN IV), écrits à l'origine pour IBM 7094 (environ 32-K mots). Programmes utiles en inventaire forestier, notamment le BMD 05 D (construction des nuages de point et des histogrammes), le BMD 06D (description des strates), le BMD 03M (analyse factorielle), le BMD 03R (régression multiple). Description détaillée des procédés de calcul de la préparation des cartes paramètres et des sorties. Software disponibles dans de nombreux centres de calcul.

(Allemand seulement) DRZ - 1968. Statistische Programme des Deutschen Rechenzentrums (programmes statistiques du Centre de calcul allemand), parties A et B. Deutsches Rechenzentrum Darmstadt (Rép. féd. allemande). Information sur les programmes PI-32 et 33. 120 pages.

Collection de programmes statistiques standard (FORTRAN IV) complémentaire des séries BMD, en particulier: NRMP (test de la distribution normale), REV (comparaison de la régression de plusieurs strates), LIPR (vérification de la linéarité des équations). Documentation et sftware du Centre de calcul allemand, Darmstadt, sur demande.

Frayer E., Wilson W., Peters R. et Bickford C.A. - 1968. ''FINSYS, an efficient data processing system for large forest inventories''. Journal of Forestry, Vol. 66, N° 12. 4 pages.

Description générale du système de programmation en FORTRAN IV pour le système IBM 7094/7040 une capacité de 32 K-mots de l'unité centrale est nécessaire) et qui couvre les dispositifs suivants: 1. Comptage exhaustif (100 pour cent); 2. Echantillonnage simple aléatoire ou systématique; 3. Echantillonnage aléatoire stratifié; 4. Double échantillonnage pour la stratification.

(F seulement) Guinaudeau F. - 1973. Expérience acquise par le CTFT en matière de traitement automatique des données d'inventaire. Réunion du Groupe IUFRO S4.02 (Inventaire forestier) à Nancy (France), en juin 1973. Volume 2 des actes de la réunion.

Ce document décrit la méthode de traitement des données utilisée du CTFT pour la programmation des données de terrain des forêts denses tropicales, et donne des exemples de feuilles de relevé de terrain et de tableaux de sortie.

Haller K.E. - 1968. Inventaire des forêts tropicales nationales. Programme de traitement par ordinateur des résultats. Usasylva, Vol. 22, N° 89. 7 pages.

Cet article contient notamment une analyse complète du problème du système de traitement des données en inventaire forestier. Le système sur IBM 1401, est beaucoup moins intéressant, car il est rédigé en Autocoder et spécialement conçu pour un inventaire au Libéria.

McCracken D.D. - 1963. Digital computer programming. J. Wiley and Sons Inc., New York, London. 240 pages.

Livre d'auto-apprentissage avancé sur la manière de résoudre des problèmes sur ordinateur. Recommandé pour la bibliographie. Index par sujets très utile.

(Allemand seulement) Müller K.H. et Streker I. - 1970. FORTRAN Programmieranleitung (Manuel de programmation FORTRAN). Hochschultaschenbücher, Vol. 804. Bibliographisches Institut Mannheim, Wien, Zürich. 140 pages.

Manuel très complet et très utile pour l'auto-apprentissage avec des applications de la programmation en FORTRAN IV (IBM) et en FORTRAN V (UNIVAC). Il est recommandé d'avoir déjà quelques connaissances de base en FORTRAN.

Nilsson, N.E. - 1967. Some Views on data processing problems in forest inventories. Compte rendu de la réunion des experts d'inventaire forestier tenue au siège de la FAO, Rome, FO/SF/67/M17.

Ce compte rendu traite du rôle du traitement des données en inventaire forestier et donne quelques indications sur les ordinogrammes de traitement des données.

NO: 11119

g) Considérations sur les dispositifs d'inventaire (Chapitre VII)

i) Inventaire forestier continu

Ware K.D. et Cunia T. - 1962. Continuous forest inventory with partial replacement of samples. Forest Science Monograph 3, 40 pages.

Etude complète sur le sondage avec renouvellement partiel de l'échantillon comprenant la formulation mathématique et l'analyse des coûts

ii) Sondage séquentiel

Chacko V.J. - 1966, Sequential sampling in forest insect surveys and diseases. The Indian Forester, Volume 92, No 4 (pages 223-239).

Théorie et utilisation de l'analyse par échantillonnage séquentiel dans le cas d'une distribution binomiale (absence ou présence d'insectes ou de dégâts) ou d'une distribution binomiale négative (distribution de type contagieux qui s'applique au dénombrement des insectes.

200 + 12

212